



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

محاسبه نویزهای الکترومغناطیسی یک موتور مغناطیس دائم به روش اجزاء  
محدود

رضا میرزاحسینی

استاد راهنما :

دکتر احمد دارابی

شهریور ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

محاسبه نویزهای الکترومغناطیسی یک موتور مغناطیس دائم به روش اجزاء

محدود

دانشجو: رضا میرزاحسینی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : برق و رباتیک

گروه : قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رضا میرزاحسینی

تحت عنوان : محاسبه نویزهای الکترومغناطیسی یک موتور مغناطیس دائم به روش اجزاء محدود

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور | امضاء | اساتید راهنما |
|-------|--------------|-------|---------------|
|       | ----         |       |               |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی | امضاء | اساتید داور |
|-------|------------------------|-------|-------------|
|       |                        |       |             |
|       |                        |       |             |
|       |                        |       |             |
|       |                        |       |             |

## تقدیر و تشکر:

حمد و سپاس کردگاری را سزااست که رخصت کسب علم و دانش را به ما عطا فرموده است. اکنون که به فضل خدا در این موقعیت قرار گرفته‌ام بر خود لازم می‌دانم تا از تمامی عزیزانی که در این پایان نامه از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان بهره برده‌ام، قدردانی نمایم.

سپاس فروان از زحمات بی دریغ کلیه اساتید گرانقدرم که در تمام مراحل همواره پشتیبان و حامی بنده بوده‌اند. به ویژه از استاد ارزشمندم جناب آقای دکتر دارابی که همواره راهنما و راه‌گشای بنده در اتمام و اکمال این پایان نامه بوده‌اند، کمال تقدیر و تشکر را دارم. در پایان از خانواده خوبم که از آغاز تاکنون همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

رضا میرزاحسینی

۱۳۹۲

## تعهد نامه

اینجانب رضا میرزاحسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق- قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه محاسبه نویزهای الکترومغناطیسی یک موتور مغناطیس دائم به روش اجزاء محدود تحت راهنمایی آقای دکتر دارابی متعهد می‌شوم که:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تاریخ

امضای دانشجو

## چکیده

موتورهای شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی دارای چگالی توان و راندمان بالایی می‌باشند اما به دلیل قطب برجسته بودن ممکن است دارای ارتعاشات و نویز بالایی باشند. بنابراین در این پایان‌نامه ارتعاشات و نویز الکترومغناطیسی یک موتور شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نشان داده می‌شود که منابع اصلی ارتعاشات و نویز الکترومغناطیسی یعنی سطح اشباع، توزیع شار، نیروهای شعاعی و ریپل گشتاور ماشین به شدت وابسته به شکل دندانه‌ها، کفشک قطب استاتور و متمرکزکننده‌های شار روتور می‌باشند. به منظور کاهش منابع الکترومغناطیسی ارتعاشات و نویز ماشین، یک موتور شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی جدید با شکل دندانه‌های خاص و کفشک‌های قطب معرفی و روش طراحی فرمولبندی می‌شود. با استفاده از فرمول‌های ارائه شده یک موتور نمونه طراحی می‌گردد. نشان داده می‌شود که با ایجاد اصلاحات ساختاری در سطح داخلی متمرکزکننده‌های شار و فاصله هوائی موتور طراحی شده می‌توان نیروهای شعاعی و ریپل گشتاور را به طور چشمگیری کاهش داد. عملکرد موتور طراحی شده با انجام تحلیل‌های الکترومغناطیسی، ساختاری و فرکانسی به روش اجزاء محدود بررسی می‌گردد و سطح فشار صوت موتور محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام شده به روش اجزاء محدود نشان دهنده عملکرد خوب موتور طراحی شده با توجه به سطح اشباع، توزیع شار، نیروهای شعاعی، ریپل گشتاور، ارتعاشات و نویز صوتی می‌باشد.

## کلمات کلیدی :

موتور شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی، نیروهای شعاعی، اشباع، ریپل گشتاور، ارتعاشات و نویز.

## مقالات مستخرج از پایان نامه

Darabi A., Tahanian H., Alaeddini A. and Mirzahosseini R., (2013) “Steps towards a Sinusoidal Back EMF for a Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet Synchronous Machine”, **PEDSTC**, pp 328-332, Tehran, Iran

Darabi A. and Mirzahosseini R., (2013) “Reduction of magnetic radial force and torque ripple in claw pole transverse flux permanent magnet motor”, **IJEAT**, Accepted for publication



## فهرست مطالب

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| فصل اول : مقدمه .....                                                                | ۱  |
| ۱-۱- مقدمه.....                                                                      | ۲  |
| ۲-۱- تاریخچه.....                                                                    | ۲  |
| فصل دوم : مفاهیم و اصطلاحات نویز در ماشین‌های الکتریکی.....                          | ۷  |
| ۱-۲- پارامترهای مختلف مرتبط با نویز صوتی.....                                        | ۸  |
| ۲-۱-۱- توان صوت.....                                                                 | ۸  |
| ۲-۱-۲- فشار صوت .....                                                                | ۸  |
| ۲-۱-۳- شدت صوت .....                                                                 | ۹  |
| ۲-۱-۴- تراز توان صوت.....                                                            | ۱۱ |
| ۲-۱-۵- تراز فشار صوت.....                                                            | ۱۱ |
| ۲-۱-۶- تراز شدت صوت .....                                                            | ۱۲ |
| ۲-۲- روابط حاکم بر پارامترهای صوت در محیط‌های مختلف انتشار .....                     | ۱۲ |
| ۲-۲-۱- رابطه میان تراز توان صوت و تراز فشار صوت.....                                 | ۱۲ |
| ۲-۲-۲- روابط میان شدت صوت و فشار صوت.....                                            | ۱۴ |
| فصل سوم : عوامل تاثیرگذار در ایجاد ارتعاشات و نویز الکترومغناطیسی .....              | ۱۶ |
| ۱-۳- عوامل ایجاد نویز در ماشین‌های الکتریکی.....                                     | ۱۷ |
| ۳-۱-۱- انواع نیروهای الکترومغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی .....                      | ۱۸ |
| ۳-۱-۱-۱- نیروهای ماکسول (رلوکتانسی).....                                             | ۱۹ |
| ۳-۱-۲- هارمونیک‌های شار فاصله هوایی و ارتباط آنها با هارمونیک‌های نیروهای شعاعی..... | ۲۴ |
| ۳-۱-۳- عوامل تاثیرگذار بر ایجاد هارمونیک‌های شار فاصله هوایی .....                   | ۲۵ |
| ۳-۱-۳-۱- اثر هارمونیک‌های شیار.....                                                  | ۲۶ |

|    |                                                                                                    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۲۷ | ..... تأثیر نامیزانی (خروج از مرکز) ۲-۳-۱-۳                                                        |
| ۲۸ | ..... توزیع نامتقارن (غیرسینوسی) سیم‌پیچی ۳-۳-۱-۳                                                  |
| ۲۸ | ..... ریپل گشتاور ۴-۱-۳                                                                            |
| ۲۹ | ..... محاسبه نویز در پاسخ به نیروهای اعمالی ۲-۳                                                    |
| ۳۲ | ..... فصل چهارم : طراحی ماشین TFPM قطب چنگالی نمونه ۳۲                                             |
| ۳۳ | ..... ۱-۴-۱ مقدمه ۳۳                                                                               |
| ۳۶ | ..... ۲-۴ بررسی اشکالات ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی ارائه شده در مراجع و ارائه اصلاحات ساختاری ۳۶ |
| ۳۸ | ..... ۳-۴ ارائه روابط ابعادی برای آهنرباهای دائم و متمرکزکننده‌های شار ۳۸                          |
| ۴۲ | ..... ۴-۴ ارائه ساختاری جدید برای پایه‌های استاتور ۴۲                                              |
| ۴۳ | ..... ۵-۴ ساختار پیشنهادی جهت جلوگیری از به اشباع رفتن متمرکزکننده شار ۴۳                          |
| ۴۴ | ..... ۶-۴ طراحی ماشین نمونه ۴۴                                                                     |
| ۴۴ | ..... ۱-۶-۴ تعیین ابعاد ماشین نمونه ۴۴                                                             |
| ۴۶ | ..... ۲-۶-۴ انتخاب مواد سازنده برای قسمت‌های اکتیو ماشین ۴۶                                        |
| ۴۸ | ..... ۳-۶-۴ اختصاص تغذیه ۴۸                                                                        |
| ۴۸ | ..... ۴-۶-۴ اعمال شرایط مرزی ۴۸                                                                    |
| ۴۹ | ..... ۵-۶-۴ مش‌بندی ۴۹                                                                             |
| ۵۰ | ..... ۷-۴ تأیید صحت الگوریتم به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود ۵۰                                |
| ۵۳ | ..... فصل پنجم : بررسی ارتعاشات و نویز صوتی موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده ۵۳                     |
| ۵۴ | ..... ۱-۵-۱ مقدمه ۵۴                                                                               |
| ۵۴ | ..... ۲-۵ تحلیل الکترومغناطیسی ۵۴                                                                  |
| ۵۹ | ..... ۱-۲-۵ ساختار پیشنهادی جهت کاهش ریپل گشتاور ۵۹                                                |
| ۶۲ | ..... ۱-۱-۲-۵ مقادیر پرونیوت پارامترهای موتور طراحی شده ۶۲                                         |

|     |                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------|
| ۶۳  | ۵-۲-۱-۲- رابطه سرعت-گشتاور.....                            |
| ۶۳  | ۵-۳-۱-۲- محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی.....                 |
| ۶۴  | ۵-۴-۱-۲- شبیه‌سازی دینامیکی گذرائی موتور.....              |
| ۷۱  | ۵-۲-۲- بررسی نیروهای شعاعی وارد بر موتور تحت بار.....      |
| ۷۱  | ۵-۱-۲-۲- راه اندازی موتور توسط منبع تغذیه سینوسی.....      |
| ۷۴  | ۵-۲-۲-۲- راه اندازی موتور توسط درایو.....                  |
| ۷۷  | ۵-۳- تحلیل ساختاری.....                                    |
| ۷۷  | ۵-۳-۱- بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی موتور.....              |
| ۸۰  | ۵-۱-۱-۳- انتخاب مواد سازنده.....                           |
| ۸۱  | ۵-۲-۱-۳- محاسبه جرم روتور.....                             |
| ۸۲  | ۵-۳-۱-۳- اعمال محدود سازهای حرکتی.....                     |
| ۸۳  | ۵-۴-۱-۳- مش‌بندی.....                                      |
| ۸۴  | ۵-۵-۱-۳- نتایج حاصل از انجام تحلیل ساختاری.....            |
| ۸۸  | ۵-۲-۳- بررسی ارتعاشات موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده..... |
| ۹۲  | ۵-۴- تحلیل فرکانسی.....                                    |
| ۹۲  | ۵-۴-۱- تعیین سطح اندازه‌گیری صوت.....                      |
| ۹۳  | ۵-۴-۲- تعیین موقعیت میکروفون‌ها.....                       |
| ۹۷  | فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....                      |
| ۹۸  | ۶-۱- جمع بندی و نتیجه‌گیری.....                            |
| ۹۹  | ۶-۲- پیشنهادات.....                                        |
| ۱۰۰ | مراجع.....                                                 |

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): روش اندازه‌گیری شدت صوت با استفاده از دو میکروفون ..... ۱۱
- شکل (۱-۳): نحوه ایجاد نیروهای شعاعی در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم ..... ۲۰
- شکل (۲-۳): نمای دقیق‌تری از نحوه ایجاد نیروهای شعاعی در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با ۸ قطب ..... ۲۰
- شکل (۳-۳): توزیع چگالی شار یک موتور القائی قفس سنجابی  $15 kW$  در حالت بی‌باری ..... ۲۱
- شکل (۴-۳): نحوه ارتعاش استاتور ماشین الکتریکی به ازای نیروهای شعاعی با مقادیر مختلف شماره مد ..... ۲۵
- شکل (۵-۳): پدیده نامیزانی استاتیک روتور ..... ۲۷
- شکل (۶-۳): پدیده نامیزانی دینامیک روتور ..... ۲۸
- شکل (۱-۴): بخشی از ساختار یک فاز ماشین TFPM قطب چنگالی ..... ۳۴
- شکل (۲-۴): ساختار یک جفت قطب ماشین TFPM قطب چنگالی ..... ۳۴
- شکل (۳-۴): ساختار شش فاز ماشین TFPM قطب چنگالی طراحی شده ..... ۳۵
- شکل (۴-۴): نمونه‌ای از توزیع چگالی شار در متمرکزکننده شار پیشنهاد شده در مراجع ..... ۳۸
- شکل (۵-۴): شار پیوندی سیم‌پیچ استاتور بر حسب موقعیت روتور ..... ۳۹
- شکل (۶-۴): تغییرات ولتاژ القائی ماشین بر حسب موقعیت روتور ..... ۳۹
- شکل (۷-۴): ساختار پیشنهادی برای پایه‌های استاتور ..... ۴۳
- شکل (۸-۴): متمرکزکننده شار جهت جلوگیری از پدیده اشباع ..... ۴۴
- شکل (۹-۴): منحنی BH آهنربای دائم در ربع دوم ..... ۴۷
- شکل (۱۰-۴): مدار تغذیه استاتور ..... ۴۸
- شکل (۱۱-۴): مش‌بندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور TFPM طراحی شده ..... ۵۰
- شکل (۱۲-۴): نقشه رنگی توزیع چگالی شار در موتور در حالت مدار باز ..... ۵۱
- شکل (۱۳-۴): توزیع برداری چگالی شار در موتور در حالت مدار باز ..... ۵۱
- شکل (۱۴-۴): تغییرات شار پیوندی سیم‌پیچ در یک سیکل الکتریکی ..... ۵۲
- شکل (۱۵-۴): Back-EMF به دست آمده از مشتق‌گیری از شار پیوندی ..... ۵۲
- شکل (۱-۵): نیروهای شعاعی وارد بر دندان استاتور موتور TFPM قطب چنگالی ..... ۵۵

- شکل (۲-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندان استاتور در حالت اشباع ..... ۵۶
- شکل (۳-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندان استاتور موتور با متمرکزکننده شار اصلاح شده ..... ۵۶
- شکل (۴-۵): گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای موتور ..... ۵۸
- شکل (۵-۵): طریقه اصلاح سطح متمرکزکننده شار ..... ۶۰
- شکل (۶-۵): طریقه اصلاح سطح زیرین دندان استاتور ..... ۶۰
- شکل (۷-۵): ساختار موتور با فاصله هوایی غیر یکنواخت ..... ۶۱
- شکل (۸-۵): مدار معادل یک فاز ماشین ..... ۶۱
- شکل (۹-۵): شماتیک شبیه‌سازی موتور طراحی شده در محیط متلب ..... ۶۵
- شکل (۱۰-۵): ولتاژ القائی ..... ۶۵
- شکل (۱۱-۵): توان خروجی موتور ..... ۶۶
- شکل (۱۲-۵): توان اکتیو ورودی موتور ..... ۶۶
- شکل (۱۳-۵): زاویه قدرت  $\delta$  موتور ..... ۶۶
- شکل (۱۴-۵): بازده موتور ..... ۶۷
- شکل (۱۵-۵): سرعت مکانیکی موتور ..... ۶۷
- شکل (۱۶-۵): گشتاور الکترومغناطیسی خروجی موتور ..... ۶۸
- شکل (۱۷-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندان استاتور موتور طراحی شده با فاصله هوایی غیر یکنواخت ..... ۶۹
- شکل (۱۸-۵): جریان جاری شده در فاز a استاتور ..... ۷۲
- شکل (۱۹-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندان‌های استاتور ..... ۷۲
- شکل (۲۰-۵): شماتیک شبیه‌سازی موتور طراحی شده به همراه درایو در محیط سیمولینک ..... ۷۴
- شکل (۲۱-۵): جریان جاری شده در فاز a استاتور ..... ۷۵
- شکل (۲۲-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندان‌های استاتور در حالت تغذیه با درایو ..... ۷۵
- شکل (۲۳-۵): پوسته انتخاب شده برای موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده ..... ۷۸
- شکل (۲۴-۵): ابعاد فریم انتخاب شده برای موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده ..... ۷۹
- شکل (۲۵-۵): اعمال محدود ساز حرکتی ..... ۸۳
- شکل (۲۶-۵): مش‌بندی انجام شده روی موتور TFPM مورد بررسی برای انجام تحلیل ساختاری ..... ۸۳

- شکل (۲۷-۵): نمای ارتعاش مدل مورد بررسی در فرکانس ۶۰۰ Hz ..... ۸۹
- شکل (۲۸-۵): نمای ارتعاش مدل مورد بررسی در فرکانس ۸۰۰ Hz ..... ۸۹
- شکل (۲۹-۵): نمای ارتعاش مدل مورد بررسی در فرکانس ۱۲۰۰ Hz ..... ۹۰
- شکل (۳۰-۵): شتاب ذرات تشکیل دهنده موتور در فرکانس ۶۰۰ Hz ..... ۹۰
- شکل (۳۱-۵): شتاب ذرات تشکیل دهنده موتور در فرکانس ۸۰۰ Hz ..... ۹۱
- شکل (۳۲-۵): شتاب ذرات تشکیل دهنده موتور در فرکانس ۱۲۰۰ Hz ..... ۹۱
- شکل (۳۳-۵): سطح کروی برای اندازه‌گیری نویز موتور طراحی شده در محیط اجزاء محدود ..... ۹۳
- شکل (۳۴-۵): محل قرارگیری میکروفون‌ها بر روی سطح کروی ..... ۹۵

## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲): مقادیر مختلف  $Q$  با توجه به محل قرارگیری منبع صوتی ..... ۱۳
- جدول (۱-۴): پارامترهای اصلی خواسته شده ..... ۴۴
- جدول (۲-۴): پارامترهای انتخابی و پارامترهای به دست آمده از روش اجزاء محدود برای طراحی ماشین نمونه ..... ۴۵
- جدول (۳-۴): ابعاد هندسی ماشین طراحی شده ..... ۴۶
- جدول (۴-۴): مشخصات مواد سازنده بخش‌های اکتیو موتور ..... ۴۷
- جدول (۱-۵): نتایج آنالیز هارمونیکی نیروهای شعاعی ..... ۵۷
- جدول (۲-۵): نتایج آنالیز هارمونیکی نیروهای شعاعی وارد بر دندان استاتور موتور طراحی شده با فاصله هوایی غیر یکنواخت ..... ۷۰
- جدول (۳-۵): نتایج آنالیز هارمونیکی نیروهای شعاعی وارد بر دندان استاتور در حالت تغذیه سینوسی ..... ۷۳
- جدول (۴-۵): نتایج آنالیز هارمونیکی نیروهای شعاعی وارد بر دندان استاتور در حالت تغذیه با درایو ..... ۷۶
- جدول (۵-۵): مشخصات مواد بکار رفته در ساختار موتور طراحی شده ..... ۸۰
- جدول (۶-۵): فرکانس‌های طبیعی موتور در دو حالت به اشباع رفتن متمرکزکننده شار و استفاده از متمرکزکننده شار اصلاح شده ..... ۸۵
- جدول (۷-۵): لیستی از فرکانس‌های طبیعی نخست حاصل از انجام تحلیل ساختاری ..... ۸۷
- جدول (۸-۵): موقعیت میکروفون‌ها بر روی سطح کروی ..... ۹۴
- جدول (۹-۵): سطح فشار صوت بدست آمده در فرکانس‌های مختلف ..... ۹۶

## فصل اوّل : مقدمه



## ۱-۱- مقدمه

یکی از اصلی‌ترین مباحث مرتبط با طراحی، ساخت و به‌کارگیری ماشین‌های الکتریکی، نویز صوتی تولیدی به وسیله آنها و نحوه کاهش آن است. شناسایی منابع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی و نحوه برطرف‌سازی آن از دهه ۱۹۴۰ تاکنون مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که صنعت نیز محدودیت‌هایی را برای نویز تولیدی ماشین‌های الکتریکی مشخص کرده است که باید این محدودیت‌ها در طراحی ساختار ماشین‌ها لحاظ شود توجه به مسئله نویز اهمیت مضاعف پیدا می‌کند. در بخش بعد برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه نویز ماشین‌های الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۱-۲- تاریخچه

محققان تلاش‌های بسیار زیادی در زمینه ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی انجام داده‌اند و مقالات و کتاب‌هایی هم در این زمینه منتشر شده است. به عنوان مثال در سال ۱۹۶۸ آقای A. J. Ellison و همکارش مقاله‌ای در زمینه نویز ماشین‌های الکتریکی دوار منتشر کردند و به طور عمیق به بررسی آن پرداختند. این مقاله همچنین فهرست خوبی از کارهای تحقیقاتی انجام شده پیرامون این موضوع قبل از سال ۱۹۶۸ را ارائه کرده است. در سال ۱۹۹۲ آقای Henneberger G. و همکارانش ارتعاشات پوسته یک ماشین الکتریکی را توسط آنالیز اجزاء محدود بررسی کردند. آقای Gieras J. F. و همکارانش در سال ۲۰۰۶ کتابی در زمینه نویز ماشین‌های الکتریکی چند فاز منتشر کردند. آن‌ها در این کتاب به بحث درباره استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی برای محاسبه نویز ماشین‌های الکتریکی پرداختند.

در زمینه نویز الکترومغناطیسی نیز تحقیقات زیادی شده است. در سال ۱۹۸۱ کتابی توسط S. Yang J. نوشته شد که در آن روش‌های عددی را برای محاسبه نویز الکترومغناطیسی ماشین‌های

الکتریکی ارائه کرده است. در سال ۱۹۹۴ آقای Belmas R. به بررسی امکان شبیه‌سازی نویز الکترومغناطیسی ماشین‌های الکتریکی توسط کامپیوتر پرداخت. او همچنین به بیان علل اصلی تولید نویز و ارتعاشات به همراه معادلاتشان برای بیان اهمیت هر یک از آنها در بحث ارتعاشات و نویز پرداخت. از دیگر کارهای او می‌توان به محاسبه نیروهای وارده بر دندانه‌های استاتور اشاره کرد. با این عمل مشخص شد که نیروهای موجود بر روی نوک دندانه‌های استاتور از سایر بخش‌های دندانه‌ها بزرگتر است. آقای Maliti K. در سال ۲۰۰۰ به تجزیه و تحلیل عمیقی در زمینه محاسبه نیروهای شعاعی الکترومغناطیسی پرداخت. او همچنین به مطالعه اثر پدیده ناهم محوری بر روی نویز ماشین‌های الکتریکی پرداخت. [۱]

در سال ۲۰۱۰ آقای Islam R. و همکارانش به تجزیه و تحلیل نویز و ارتعاشات در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم پرداختند. در این بررسی نیروهای الکترومغناطیسی به عنوان یکی از علل اصلی نویز و ارتعاشات در این ماشین‌ها معرفی شدند. آنها به تحلیل تغییر شکل شعاعی ماشین در نتیجه وارد کردن فشارهای شعاعی بر آن پرداختند. جابجایی شعاعی محاسبه شد و توسط آن نویز و ارتعاشات ساختارهای مختلف ماشین سنکرون مغناطیس دائم تخمین زده شد. آقای Bracikowski N. و همکارانش در سال ۲۰۱۱ ارتعاشات و نویز یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم را با استفاده از روش اجزاء محدود مدل کردند. [۲]

در مورد روش تحلیل ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی نیز بهتر است توضیحاتی داده شود. نویز الکترومغناطیسی در نتیجه تاثیر نیروهای الکترومغناطیسی بر سطح دندانه‌های استاتور در فاصله هوایی بوجود می‌آید. سطح ارتعاش و نویز ماشین بستگی به ویژگی‌های ارتعاشی استاتور دارد که دانستن این ویژگی‌ها بخصوص فرکانس‌های طبیعی استاتور برای تحلیل نویز ساطع شده از یک ماشین الکتریکی ضروری می‌باشد. در مراجع از روش‌های مختلفی برای بررسی ویژگی‌های ارتعاشی و نویز ماشین‌های الکتریکی استفاده شده است. از آنجا که بررسی دقیق ارتعاشات و نویز ماشین‌های

الکتریکی در محیط‌های نرم‌افزاری نیازمند صرف زمان‌های طولانی و حجم محاسبات بالا می‌باشد حافظه کامپیوترهای در دسترس محدودیت‌هایی را برای بررسی ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی ایجاد می‌کند. این محدودیت‌ها سبب استفاده از فرضیات، ساده‌سازی‌ها و تکنیک‌هایی برای کاهش حجم محاسبات در تحلیل ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی شده است. البته با معرفی روش اجزاء محدود و افزایش حافظه کامپیوترهای در دسترس می‌توان ماشین‌هایی با ساختار پیچیده‌تر را هم مدل کرد اما باز هم محدودیت‌ها به طور کامل رفع نشده و نیاز به ساده‌سازی‌هایی می‌باشد. استفاده از این فرضیات و ساده‌سازی‌ها سبب ایجاد مدل‌های مختلف برای تحلیل ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی شده است. به عنوان نمونه مدل‌هایی با عنوان مدل دو بعدی، مدل سه بعدی، مدل رینگ، مدل رینگ دابل، مدل استوانه برای بررسی ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی مطرح شدند. [۳]

برخی از تحقیقات در زمینه ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی با استفاده از مدل دو بعدی و یا سه بعدی انجام شده است. در مدل سه بعدی حجم و زمان محاسبات نسبت به مدل دو بعدی بیشتر بوده و نیاز به کامپیوترهایی با حافظه بیشتری می‌باشد.

در سال ۱۹۵۶ آقای Alger P. L. و همکارش از مدل ۲ بعدی برای تحلیل ارتعاشات ماشین‌های الکتریکی استفاده کردند. در این مدل از دو رینگ هم مرکز استفاده شده است که رینگ خارجی نشان دهنده پوسته و رینگ داخلی نشان دهنده هسته استاتور، دندانه‌ها و سیم‌پیچی می‌باشد که دندانه‌ها به صورت جرمی بر روی استاتور در نظر گرفته شده‌اند. در این تحلیل نیروهای الکترومغناطیسی به عنوان عامل ارتعاش به رینگ داخلی اعمال شدند. به دلیل اتصال دو رینگ به هم، رینگ خارجی هم شروع به ارتعاش می‌کند که ارتعاش این دو رینگ سطح نویز ماشین را مشخص می‌کند. این مدل برای تخمین فرکانس‌های طبیعی، ارتعاشات و نهایتاً مشخص کردن سطح فشار صوت ماشین به کار رفت. [۴]

در مرجع [۵] ارتعاشات یک موتور القائی مورد بررسی قرار گرفت. در این مرجع سیم‌پیچی‌ها و

دندانها به صورت یک جرم در نظر گرفته شده که بر روی استاتور قرار داده شده است.

در مرجع [۶] ارتعاشات و نویز یک موتور القائی 5hp، 420V که با سرعت 2900rpm می-چرخد مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع سیم‌پیچی و دندانها به صورت بخش‌های جداگانه که به استاتور متصل می‌باشند در نظر گرفته شده‌اند.

در مرجع [۷] ارتعاشات و نویز یک موتور القائی سه فاز 2.2KW، 415V، 50Hz مورد بررسی قرار گرفته است و از مدل استوانه‌ای در محیط نرم‌افزار ANSYS استفاده کرده است. در این مرجع پوسته استاتور به صورت استوانه ساده‌ای در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۸] یک موتور قفس سنجابی 37KW، 415V، 50Hz مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع پایه‌ها، سیم‌پیچی‌ها، برجستگی‌های روی پوسته در نظر گرفته شده‌اند اما جهت ساده‌سازی از ترمینال ماشین صرف‌نظر شده است و با این فرضیات ارتعاشات و نویز ماشین مورد بررسی قرار گرفته است.

تا اینجا توضیحاتی درباره تحقیقات انجام شده در زمینه ارتعاشات و نویز ماشین‌های الکتریکی داده شد. اما در مورد ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی<sup>۱</sup> به دلیل ساختار بسیار نو و کم بودن منابع طراحی، مسئله ارتعاشات و نویز دارای اهمیت مضاعف می‌باشد. مراجع مربوط به تحلیل ساختار و عملکرد ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی بسیار اندک می‌باشند و با توجه به بررسی‌های انجام شده احتمالاً علل الکترومغناطیسی ارتعاشات و نویز این نوع ماشین‌ها بطور خاص در هیچ مقاله‌ای بررسی نشده است. به این دلیل در این پژوهش، یک موتور شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی مورد بررسی و تحلیل ساختاری از نقطه نظر ارتعاشات و نویز قرار می-گیرد. با در نظر گرفتن اهمیت ریپل گشتاور و نیروهای شعاعی الکترومغناطیسی در میزان ارتعاشات و

1- Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet Machine

نویز صوتی ماشین، هدف اصلی در این پژوهش، کاهش این دو پارامتر مهم در یک موتور شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی است.

برای بررسی ارتعاشات و نویز موتور شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی آشنایی با مفاهیم و اصطلاحات نویز ضروری می‌باشد. بنابراین در فصل دوم مفاهیم و اصطلاحات مرتبط با نویز ماشین-های الکتریکی و روابط ریاضی مربوط به این اصطلاحات مطرح می‌شود.

در فصل سوم منابع نویز در ماشین‌های الکتریکی معرفی می‌شوند. سپس با توجه به موضوع این پایان‌نامه منابع الکترومغناطیسی نویز در ماشین‌های الکتریکی بررسی می‌شود و روابط ریاضی مربوط به این منابع با نویز ماشین ارائه می‌گردد.

در فصل چهارم در مورد عملکرد و ساختار ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی بحث می‌شود و اشکالات ساختاری و الگوریتم ارائه شده در مقالات مطرح و برای رفع آن‌ها ماشینی قطب چنگالی با ساختار جدید ارائه می‌شود. سپس یک ماشین نمونه با ساختار جدید طراحی و با شبیه‌سازی در محیط اجزاء محدود پارامترهای اساسی آن بدست می‌آید.

در فصل پنجم به تحلیل الکترومغناطیسی دینامیکی ماشین طراحی شده پرداخته و نیروهای شعاعی و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین به عنوان دو عامل اساسی در ایجاد ارتعاشات و نویز بررسی می‌شود و اصلاحاتی در ساختار ارائه شده برای کاهش این دو عامل که نهایتاً منجر به کاهش ارتعاشات و نویز ماشین می‌شود ارائه می‌گردد. سپس با انجام آنالیز ساختاری فرکانس‌های طبیعی و ارتعاشات ماشین طراحی شده بررسی می‌شود. نهایتاً با انجام آنالیز فرکانسی و با استفاده از نیروهای بدست آمده از تحلیل الکترومغناطیسی نویز ماشین محاسبه می‌شود.

در فصل ششم برخی پیشنهادات برای علاقه‌مندان به پژوهش در زمینه ارتعاشات و نویز ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی ارائه می‌شود.

فصل دوم : مفاهیم و اصطلاحات نوین در ماشین-

های الکتریکی

برای بررسی نویز الکترومغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی ابتدا نیاز است تا مفاهیم و اصطلاحات مرتبط با نویز مطرح شوند. در این فصل مفاهیم و اصطلاحات نویز به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۱-۲- پارامترهای مختلف مرتبط با نویز صوتی

کمیت‌های مختلف موجود جهت اندازه‌گیری نویز صوتی عبارتند از توان صوت<sup>۱</sup>، فشار صوت<sup>۲</sup>، شدت صوت<sup>۳</sup>، تراز توان صوت<sup>۴</sup>، تراز فشار صوت<sup>۵</sup> و تراز شدت صوت<sup>۶</sup>. این کمیت‌ها در ادامه به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۱-۱-۲- توان صوت

توان صوت یک کمیت اسکالر بوده و به صورت مقدار انرژی صوتی منتشر شده از یک منبع صوتی در واحد زمان، بر حسب وات (W) تعریف و اندازه‌گیری می‌گردد. [۷]

### ۲-۱-۲- فشار صوت

فشار صوت در یک نقطه، عبارتست از مقدار نیرویی که از جانب صوت بر جزء کوچکی از سطح در آن نقطه وارد می‌گردد. واحد اندازه‌گیری این کمیت پاسکال (Pa) است و 1 Pa با  $1 \text{ N/m}^2$  معادل می‌باشد. هر منبع صوتی با مقدار توان صوتی مشخص، مقادیر فشار صوتی مختلفی را در نقاط مختلف محیط اطراف خود به وجود می‌آورد که به مشخصات محیط نظیر ماده محیط انتشار صوت و

---

1- Sound Power

2- Sound Pressure

3- Sound Intensity

4- Sound Power Level (PWL)

5- Sound Pressure Level (SPL)

6- Sound Intensity Level

فاصله هر نقطه از منبع وابسته است. میزان درک گوش انسان از صوت در یک مکان، مستقیماً با مقدار فشار صوتی در نقطه مزبور ارتباط دارد. گوش انسان قادر به شنیدن اصوات در محدوده فرکانسی 20 Hz تا 20 KHz و محدوده فشار صوتی 20 μPa تا 200 Pa می‌باشد.

همانند توان صوتی، فشار صوتی نیز یک کمیت اسکالر است؛ بدین معنا که مقدار فشار صوتی اندازه‌گیری شده در یک مکان به نحوه جهت‌گیری جزء سطح در آن مکان وابسته نیست. از اینرو، اندازه‌گیری فشار صوتی در هر مکان توسط یک پروب فشارسنج صوتی (میکروفون) و بدون توجه به نحوه جهت‌گیری آن صورت می‌گیرد. برای مثال، اندازه‌گیری فشار صوتی حاصل از اغلب ماشین‌های الکتریکی از طریق نصب میکروفون در فاصله حدود 1m از ماشین قابل انجام خواهد بود. [۷]

## ۲-۱-۳- شدت صوت

شدت صوت در یک نقطه به صورت ضرب فشار صوتی آن نقطه در سرعت ذره تعریف می‌گردد. مطابق با رابطه (۱-۲)، شدت صوت با توان صوتی دریافت شده توسط جزء سطحی با بردار نرمال هم-جهت با جهت انتشار صوت در نقطه مزبور برابر خواهد بود. بر این اساس، واحد اندازه‌گیری کمیت مزبور  $W/m^2$  می‌باشد.

$$\vec{I} = \vec{p} \vec{u} = \frac{Force}{S} \frac{Disance}{Time} \vec{n} = \frac{Energy}{S Time} \vec{n} = \frac{W}{S} \vec{n} \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲)، نمادهای  $p$ ،  $W$ ، و  $S$ ، به ترتیب نماینده فشار صوتی، توان صوتی دریافتی، و جزء سطح در نقطه مورد نظر بوده و  $I$  و  $n$  بردارهای نرمال سطح و شدت صوت در نقطه مزبور را نشان می‌دهند. همچنین، نماد  $u$  معرف بردار سرعت ذرات است.

به منظور درک روش اندازه‌گیری شدت صوت، ابتدا می‌بایست به معادله نویر- استوکس<sup>۱</sup> حاکم بر

1- Navier-Stokes

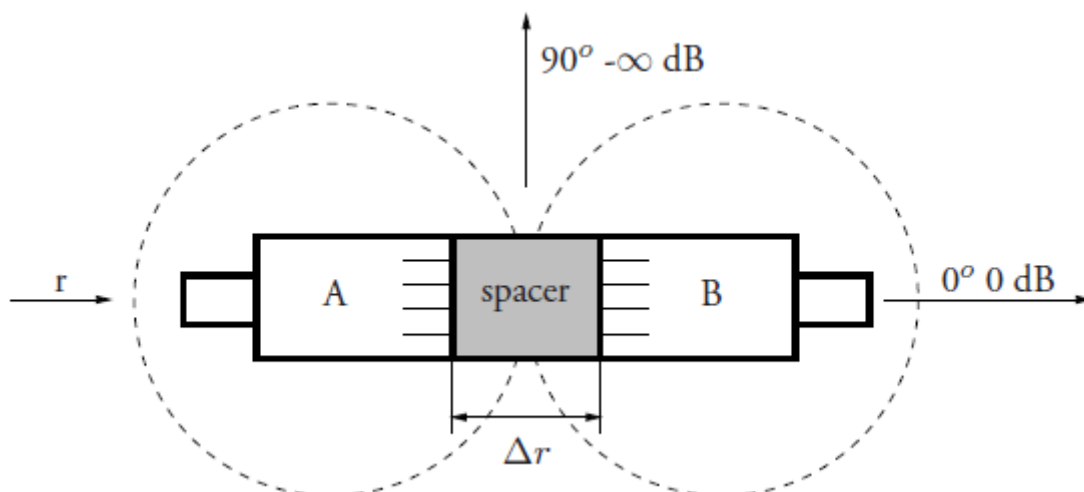


نحوه حرکت ذرات سیال، مطابق با رابطه (۲-۲) توجه گردد. بر این اساس، مقدار سرعت ذره<sup>۱</sup> ( $u$ ) با استفاده از رابطه (۳-۲) به صورت ضربی از اختلاف فشار صوتی ( $p$ ) بین دو نقطه A و B با فاصله کوچک  $\Delta r$  به دست می‌آید که در این رابطه  $\rho$  نماینده چگالی سیال و  $r$  بردار مکان نقطه اندازه‌گیری نسبت به منبع انتشار صوت است).

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (۲-۲)$$

$$u = - \frac{1}{\rho \Delta r} \int (p_B - p_A) dt \quad (۳-۲)$$

با توجه به رابطه (۳-۲)، سرعت ذرات را می‌توان از طریق اندازه‌گیری فشار صوتی در نقاط A و B به وسیله دو میکروفون با فاصله  $\Delta r$ ، مطابق با شکل (۱-۲) به دست آورد. در این شکل، بردار  $r$  جهت انتشار صوت را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، شدت صوت برخلاف کمیت‌های پیشین، کمیتی برداری است و پروب شکل (۱-۲) همواره مؤلفه‌ای از بردار شدت صوت را که با محور پروب هم‌راستا است، اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین، چنانچه جهت‌گیری محور پروب با بردار  $r$  هم‌راستا باشد، بیشترین مقدار اختلاف فشار صوتی میان نقاط A و B به وجود آمده و میزان شدت صوت اندازه‌گیری شده بر حسب دسی‌بل برابر با 0db خواهد بود. برعکس، در حالتی که محور پروب بر راستای انتشار صوت (بردار  $r$ ) عمود باشد، مقدار اندازه‌گیری شده توسط پروب برابر با  $-\infty$  db است. در حالت کلی که محور پروب با راستای انتشار صوت زاویه  $\theta$  می‌سازد، جهت حصول مقدار واقعی شدت صوت می‌بایست مقدار اندازه‌گیری شده به وسیله پروب را در  $\cos \theta$  ضرب نمود. [۷]



شکل (۱-۲): روش اندازه‌گیری شدت صوت با استفاده از دو میکروفون

## ۴-۱-۲- تراز توان صوت

از آنجا که توان صوت، محدوده تغییرات نسبتاً وسیعی دارد، معمولاً، از لگاریتم آن استفاده می‌شود. بر این اساس، تراز توان صوت یک منبع صوت مطابق با رابطه (۴-۲) به صورت ۱۰ برابر لگاریتم نسبت توان صوتی تولیدی منبع به توان صوتی مبنا ( $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$  در هوا)، برحسب دسی‌بل (db) تعریف می‌گردد. در رابطه (۴-۲)، نمادهای  $L_w$ ،  $W$  و  $W_0$ ، به ترتیب نماینده تراز توان صوت منبع، توان صوتی منبع، و توان صوتی مبنا می‌باشند. [۷] و [۹]

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (۴-۲)$$

## ۵-۱-۲- تراز فشار صوت

همانند توان صوتی، به دلیل محدوده وسیع تغییرات فشار صوت به‌جای فشار صوت، از تراز فشار صوت مطابق با رابطه (۵-۲) استفاده می‌شود.

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (۵-۲)$$

در رابطه (۵-۲)، نمادهای  $L_p$  و  $p_0$ ، به ترتیب معرف تراز فشار صوت در نقطه مورد نظر و فشار صوتی مینا بوده و  $p$  مقدار فشار صوتی را در نقطه مزبور نشان می‌دهد. [۷] و [۹]

## ۲-۱-۶- تراز شدت صوت

هر چه شدت صوت بیشتر باشد مقدار انرژی که گوش دریافت می‌کند بیشتر است و انسان صدا را بلندتر احساس می‌کند. با این حال، این بدان معنا نیست که بلندی صوت با شدت آن نسبت مستقیم داشته باشد، مثلاً اگر شدت صوت دو برابر شود بلندی صدا دو برابر نمی‌شود. به همین دلیل، جهت بیان درک انسان از بلندی صوت کمیتی به نام تراز شدت صوت تعریف می‌گردد. تراز شدت صوت در یک نقطه مطابق با رابطه (۶-۲) به صورت ۱۰ برابر لگاریتم (مینای ۱۰) نسبت اندازه بردار شدت صوت در نقطه مزبور بر مقدار شدت صوت مینا ( $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  در هوا)، بیان می‌شود.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (۶-۲)$$

در رابطه (۶-۲) نمادهای  $L_I$ ،  $I$  و  $I_0$ ، به ترتیب نماینده تراز شدت صوت، شدت صوت در نقطه مورد نظر و شدت صوت مینا می‌باشند. [۷]

## ۲-۲- روابط حاکم بر پارامترهای صوت در محیط‌های مختلف

### انتشار

#### ۲-۲-۱- رابطه میان تراز توان صوت و تراز فشار صوت

چنانچه محیط انتشار صوت حاوی شرایط خاصی باشد، می‌توان روابطی را میان تراز توان صوت و تراز فشار صوت بیان نمود. برای مثال، رابطه (۷-۲) تراز توان صوت را با تراز فشار صوت با توجه به محل قرارگیری منبع صوتی مرتبط می‌سازد. در این رابطه،  $PWL$  توان صوت بر حسب دسی‌بل،

$SPL$  فشار صوت بر حسب دسی‌بل،  $r$  شعاع اندازه‌گیری (فاصله از منبع صوتی)،  $Q$  ضریب جهت، و  $R$  ثابت محیط می‌باشد.

$$PWL = SPL - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (7-2)$$

ضریب جهت ( $Q$ ) پارامتری است که مقدار آن بستگی به محل قرارگیری منبع صوتی دارد. مقادیر  $Q$  را می‌توان با توجه به جدول (۱-۲) تعیین کرد.

جدول (۱-۲): مقادیر مختلف  $Q$  با توجه به محل قرارگیری منبع صوتی [۹]

| مقدار $Q$ | محل قرارگیری منبع صوتی (موتور)                                                                          |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱         | اگر منبع صوتی به گونه‌ای باشد که از تمامی جهاتش صوت مشابه منتشر شود.                                    |
| ۲         | منبع صوتی بر روی سطح صاف بیکران قرار گرفته است. مثلاً در وسط اتاقی بزرگ بر روی کف اتاقی قرار گرفته است. |
| ۴         | اگر منبع صوتی بر روی کف اتاقی بزرگ و در نزدیکی یکی از دیوارهای آن قرار گرفته باشد.                      |
| ۸         | اگر منبع صوتی بر روی کف اتاقی بزرگ و در یکی از گوشه‌های آن قرار گرفته باشد.                             |

ضریب  $R$  در واقع میزان صوتی را که محیط اندازه‌گیری قادر به جذب آن است نشان می‌دهد. برای محاسبه این ضریب ابتدا باید پارامتری به نام  $\bar{\alpha}$  را محاسبه نمود.  $\bar{\alpha}$  مقدار متوسط ضریب جذب صوت برای یک محیط بوده و به صورت رابطه (۸-۲) تعریف می‌شود.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum A_i \alpha_i}{\sum A_i} \quad (8-2)$$

در رابطه (۸-۲)،  $\alpha_i$  ضریب جذب صوت برای یک ماده خاص، و  $A_i$  مساحتی از محفظه اندازه‌گیری است که توسط ماده مورد نظر پوشیده شده و بر حسب متر مربع بیان می‌گردد. بر این اساس، ضریب  $R$  به صورت رابطه (۹-۲) قابل تعریف است که در آن  $A$  کل مساحت محفظه اندازه‌گیری بر حسب متر مربع می‌باشد.

$$R = \frac{\bar{\alpha}A}{1 - \bar{\alpha}} \quad (9-2)$$

برای یک محفظه اندازه‌گیری که دیواره آن به طور کامل صوت منتشر شده را جذب می‌کند، ضریب  $R$  برابر با بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. همچنین، برای یک محفظه اندازه‌گیری که دیواره آن به طور کامل صوت منتشر شده را منعکس می‌کند ضریب  $R$  برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. [۹]

## ۲-۲-۲- روابط میان شدت صوت و فشار صوت

در فضای آزاد فاقد انعکاس (نظیر فضای باز یا اتاق بدون انعکاس که تمام صوت منتشر شده به - وسیله منبع صوت، توسط دیواره‌ها جذب می‌شود)، میان شدت صوت و فشار صوتی رابطه (۱۰-۲) برقرار است. در این رابطه نمادهای  $p$ ،  $\rho$ ،  $c$  و  $I$  به ترتیب نشان دهنده مقدار فشار صوت، چگالی، سرعت و شدت صوت در نقطه مورد نظر می‌باشند.

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (10-2)$$

با ترکیب روابط (۶-۲) و (۱۰-۲)، تراز شدت صوت ( $L_I$ ) حاصل می‌شود. در مقابل، در محیط پراانعکاس رابطه میان شدت صوت و فشار صوتی به صورت رابطه (۱۱-۲) بیان می‌گردد.

$$I = \frac{p^2}{4\rho c} \quad (11-2)$$

در ساير محیط‌های اندازه‌گیری باید رابطه (۲-۱۰) را بر ضريب  $k_{sr}$  که معرف ضريب انعکاس صوت<sup>۱</sup> است تقسیم کرد. این ضريب به ویژگی‌های انعکاسی محیط انتشار صوت بستگی دارد. [۷]

---

1- Sound Radiation Factor

فصل سوم : عوامل تاثیرگذار در ایجاد ارتعاشات و

نویز الکترومغناطیسی

تا اینجا روابط مربوط به پارامترهای مختلف صوت بیان گردید. اما برای بررسی نویز ماشین‌های الکتریکی ابتدا نیاز است که عوامل ایجاد ارتعاشات و نویز در ماشین‌های الکتریکی مورد بررسی قرار گیرند. سپس رابطه این عوامل با ارتعاشات و نویز ماشین بیان گردد. در این فصل این موارد به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۳-۱- عوامل ایجاد نویز در ماشین‌های الکتریکی

عوامل ایجاد نویز در یک ماشین الکتریکی را به سه دسته عمده زیر تقسیم‌بندی می‌کنند [۷]:

۱- عوامل مکانیکی

۲- عوامل آیرودینامیکی

۳- عوامل الکترومغناطیسی

عوامل مکانیکی مختلفی سبب ایجاد ارتعاشات و نویز در ماشین‌های الکتریکی می‌شوند. این عوامل یا ناشی از عدم دقت کافی در ساخت و سرهم کردن قطعات و یا ناشی از بار وصل شده به موتور می‌باشد. این عوامل عبارتند از نامیزانی، خمیدگی شفت، عدم هم‌محوری، لقی مکانیکی، ترک خوردن شفت، زیرساخت و پایه و ... می‌باشند.

از آنجائی که موتور و قطعات آن از جمله سیم‌پیچی‌ها در اثر کار، گرم می‌شوند احتیاج به خنک کردن خواهند داشت. معمولاً موتورهای الکتریکی بوسیله یک فن که با گردش روتور می‌چرخد و در انتهای محور روتور است خنک می‌شوند. سیستم‌های خنک کننده جزء عوامل آیرودینامیک ایجاد نویز در موتورهای الکتریکی هستند.

نیروهای الکترومغناطیسی و ریپل گشتاور منابع اصلی نویز الکترومغناطیسی می‌باشند و در این

پایان‌نامه هم هدف بررسی این دو عامل الکترومغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی است. [۱۰]



### ۳-۱-۱- انواع نیروهای الکترومغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی

نیروهای الکترومغناطیسی که باعث ایجاد ارتعاش و نویز در ماشین‌های الکتریکی می‌شوند را می‌توان به چند دسته تقسیم کرد [۲]:

- نیروهایی که بر روی سطح دندان‌های استاتور اثر می‌گذارند:

این نیروها که علت اصلی ارتعاشات شعاعی و مماسی در ماشین‌های الکتریکی هستند، با نام نیروهای ماکسول (رلوکتانسی)<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند. این نیروها در فاصله هوایی بین روتور و استاتور به نوک دندان‌های استاتور وارد می‌شوند. عواملی چون شکل هندسی شیارها، طول فاصله هوایی، آرایش سیم‌پیچ‌ها، سطح اشباع و... در ایجاد این نیروها مؤثرند.

- نیروهایی که بر روی سیم‌پیچی‌های آرمیچر اثر می‌گذارد:

هر گاه سیمی حامل جریان در یک میدان مغناطیسی واقع شود از طرف آن میدان نیرویی بر آن سیم وارد شده و باعث انحراف آن سیم در میدان مغناطیسی می‌گردد. اگر جریان سیم مستقیم باشد جهت انحراف سیم ثابت بوده و در یک جهت منحرف می‌شود ولی اگر جریان در سیم متناوب باشد نیروی وارد بر سیم نیز متناوب است و سیم در آن میدان مغناطیسی شروع به لرزیدن می‌کند. به طور کلی به نیرویی که از طرف یک میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان وارد می‌شود نیروی لورنتز گویند و توسط رابطه زیر مقدار آنرا محاسبه می‌کنند:

$$F = \int I dl \times B \quad (1-3)$$

که در این رابطه  $I$  جریان سیم،  $l$  طول سیم و  $B$  شدت میدان مغناطیسی است. بسته به ساختار ماشین الکتریکی مورد بررسی، نیروی مزبور می‌تواند سبب ایجاد گشتاور محرک و یا حتی ایجاد ارتعاش در سیم‌پیچی آرمیچر گردد. ارتعاش سیم‌پیچی‌های آرمیچر می‌تواند سبب از دست رفتن عایق

1- Reluctance - Forces (or Maxwell Forces)

سیم‌پیچی‌ها و ایجاد اتصال کوتاه شود و در پاره‌ای از موارد به خاطر جریان اتصال کوتاه شدید ایجاد شده سبب تضعیف آهنرباهای موجود در ماشین گردد.

- نیروهایی که در اثر تغییر طول آهنرباها بوجود می‌آید:

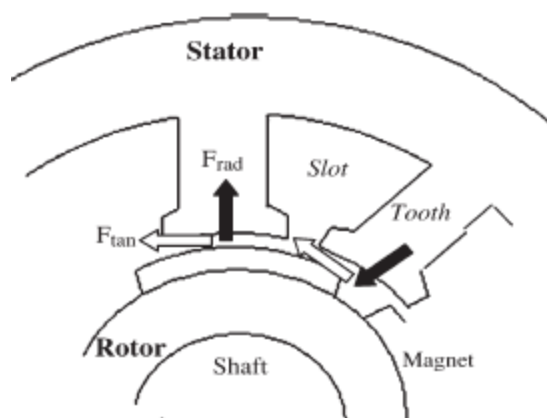
هنگامی که یک ماده فرومغناطیس در یک میدان مغناطیسی قوی قرار می‌گیرد دو قطبی‌های آن در راستای میدان تغییر جهت می‌دهند. این تغییر جهت دو قطبی‌ها سبب تغییر طول ماده فرومغناطیس می‌شود. این امر سبب ایجاد نیروهای الکترومغناطیسی می‌گردد.

نیروی رلوکتانسی در مقایسه با نیروهای دیگر مهم‌تر است، زیرا معمولاً سهم بیشتری در ایجاد ارتعاش دارد [۱]. بنابراین در این پایان‌نامه، نیروی رلوکتانسی به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

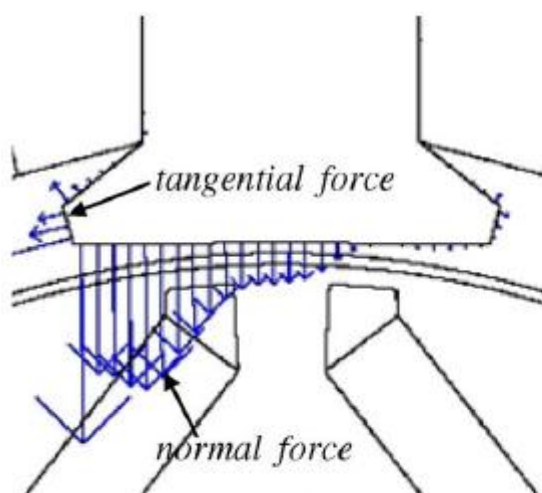
### ۳-۱-۱-۱- نیروهای ماکسول (رلوکتانسی)

چنانچه در بخش قبل ذکر شد این نیروها علت اصلی ارتعاشات شعاعی و مماسی در ماشین‌های الکتریکی هستند که با وارد شدن به دندانه‌های استاتور در فاصله هوایی سبب ایجاد ارتعاش و نویز با منشأ الکترومغناطیسی می‌شوند. در شکل‌های (۳-۱) و (۳-۲) این نیروها در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم نشان داده شده‌اند. مطابق با این شکل‌ها، با تجزیه این نیروها، دو مؤلفه یکی در راستای مماس بر مسیر چرخش روتور (نیروهای مماسی یا  $F_{tan}$ )، و دیگری در راستای عمود بر مسیر چرخش (نیروهای شعاعی یا  $F_{rad}$ ) حاصل می‌شود. نیروهای مماسی به چرخش روتور کمک می‌کنند، در حالی که نیروهای شعاعی در ایجاد گشتاور مفید خروجی ماشین نقشی نداشته و تنها باعث انبساط و انقباض ساختار ماشین و ایجاد نویز صوتی می‌شوند. [۱۲]

بنابراین در بررسی نویز ماشین‌های الکتریکی تنها نیروهای شعاعی در نظر گرفته می‌شوند. به همین دلیل در بخش‌های بعد روابط ریاضی مربوط به نیروهای شعاعی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

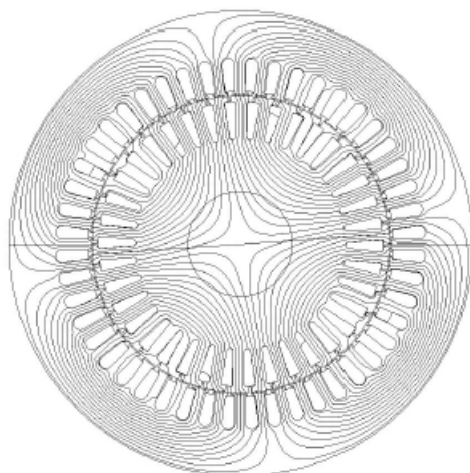


شکل (۱-۳): نحوه ایجاد نیروهای شعاعی در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم [۱۰]



شکل (۲-۳): نمای دقیق تری از نحوه ایجاد نیروهای شعاعی در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با ۸ قطب [۱۱]

برای بیان رابطه ریاضی مربوط به نیروهای شعاعی ابتدا باید توزیع چگالی شار ماشین مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی برای اینکه بتوان در یک ماشین الکتریکی گشتاور مطلوب تولید کرد نیاز به یک میدان مغناطیسی در فاصله هوایی می باشد. کمیت اصلی میدان مغناطیسی چگالی شار است. نمایی از توزیع چگالی شار تولیدی یک موتور قفس سنجابی در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): توزیع چگالی شار یک موتور القائی قفس سنجابی  $15\text{ kW}$  در حالت بی‌باری [۱]

در یک ماشین ایده آل فقط چگالی شار با موج اصلی  $B_{s1}$  و با فرکانسی برابر با فرکانس منبع تغذیه  $\omega_{s1}$  و شماره موج  $z$  که برابر با تعداد جفت قطب‌های ماشین است وجود دارد. اما از آنجایی که یک ماشین واقعی دارای شیار و سیم‌پیچی‌های توزیع شده است، چگالی شار دارای هارمونیک‌های ناخواسته‌ای می‌شود و کل چگالی شار توزیع شده در فاصله هوایی به صورت حاصل جمع موج‌های چگالی شار با فرکانس متغیر  $\omega_{si}$  و شماره موج  $z_i$  می‌شود. در این صورت می‌توان چگالی شار ماشین را به صورت مجموع چگالی شار موج اصلی و سایر هارمونیک‌ها به صورت رابطه (۲-۳) نوشت:

$$B_s(t, \varphi) = \text{Re}[B_{s1}e^{j(z\varphi - \omega_{s1}t + \alpha_{s1})} + \sum_{i=2, \dots} B_{si}e^{j(z_i\varphi - \omega_{si}t + \alpha_{si})}] \quad (2-3)$$

که  $B_s$  چگالی شار ناشی از تغذیه ماشین با منبع سینوسی،  $\alpha$  زاویه فاز،  $\varphi$  موقعیت روتور می‌باشد. هارمونیک‌های چگالی شار ( $i \geq 2$ ) باعث زیاد شدن تلفات می‌شوند و تولید ارتعاش و نویز می‌کنند. این هارمونیک‌های چگالی شار با استفاده از مبدل فرکانسی افزایش پیدا می‌کنند که این امر شرایط را بدتر می‌کند. این مسئله برای موتور مورد بررسی در فصل‌های بعد نشان داده خواهد شد. در صورت استفاده از مبدل‌های فرکانسی رابطه (۲-۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$B_{conv}(t, \varphi) = B_s(t, \varphi) + B_c(t, \varphi) \quad (3-3)$$

که در این رابطه  $B_c$  هارمونیک‌های چگالی شار تولید شده توسط مبدل فرکانسی و  $B_{conv}$  چگالی شار  
منتجه ناشی از تغذیه ماشین با مبدل‌های فرکانسی می‌باشد [۱]. باید ذکر شود که چگالی شار بیان  
شده در رابطه (۳-۳) شامل دو مولفه افقی و عمودی می‌باشد. با تجزیه این چگالی شار به دو مولفه  
افقی و عمودی، می‌توان دیفرانسیل نیروی وارد بر روی سطح دندان استاتور  $dF$  را در مختصات  
استوانه‌ای توسط رابطه زیر محاسبه نمود [۱۲]:

$$dF = \frac{L}{\mu_0} \left[ \frac{1}{2} (B_r^2 - B_\phi^2) u_r + (B_r B_\phi) u_\phi \right] \quad (۴-۳)$$

که در این رابطه  $L$  طول محوری ماشین،  $\mu_0$  پرمابیلیتی هوا،  $B_r$  مولفه شعاعی چگالی شار،  $B_\phi$   
مولفه مماسی چگالی شار،  $u_r$  و  $u_\phi$  به ترتیب بردارهای واحد شعاعی و مماسی می‌باشند. مطابق  
روابط زیر با انتگرالگیری از رابطه (۴-۳) می‌توان نیروهای شعاعی و مماسی وارد بر دندان‌های استاتور  
را بدست آورد.

$$F_{\tan} = L \int_0^{D_g/2} f_t dr = \frac{L}{\mu_0} \int_0^{D_g/2} B_\phi B_r dr \quad (۵-۳)$$

$$F_{rad} = L \int_0^{2\pi} f_r r d\phi = \frac{L}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} (B_r^2 - B_\phi^2) r d\phi \quad (۶-۳)$$

در این روابط  $F_{rad}$  و  $F_{\tan}$ ، به ترتیب مولفه‌های مماسی و شعاعی نیرو و  $D_g$  قطر صفحه فاصله هوایی  
را نشان می‌دهند. چنانچه در روابط فوق نشان داده شده است جهت محاسبه نیروی مماسی انتگرال-  
گیری در مسیر شعاعی انجام می‌گیرد. این در حالی است که محاسبه مقدار کل نیروی شعاعی از  
طریق انتگرالگیری در مسیر دایره‌ای شکل گرداگرد روتور به ازای تغییرات زاویه  $\phi$  در مختصات  
استوانه‌ای از صفر تا  $2\pi$  رادیان صورت می‌پذیرد. [۱۰]

از آنجا که ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته فرومغناطیسی خیلی بزرگتر از ضریب  
نفوذپذیری مغناطیسی هوا است، خطوط شار مغناطیسی عملاً نسبت به هسته‌های استاتور و روتور

عمود هستند. این بدان معناست که مولفه مماسی شار خیلی کوچکتر از مولفه شعاعی است و می‌توان آن را نادیده گرفت. در این صورت مقدار دیفرانسیل نیروی شعاعی وارد بر سطح دندان‌های استاتور برابر است با [۱۰]:

$$dF_r = \frac{B_r^2}{2\mu_0} Lu_r \quad (7-3)$$

با انتگرالگیری از رابطه فوق نیروهای شعاعی وارد بر دندان‌های استاتور بدست می‌آیند. اگر چگالی شار بر حسب حاصل جمع موج‌های کسینوسی در نظر گرفته شود نیروی شعاعی توزیع شده بر روی دندان‌ها  $F_r$  به صورت زیر خواهد بود:

$$F_r(t, \varphi) = \sum_i F_{r,i} \cos(\omega_i t + z_i \varphi + \phi_i) \quad (8-3)$$

مولفه‌های نیروهای شعاعی سعی می‌کنند ساختاری را که بر آن اثر می‌گذارند را منحرف کنند به عبارت دیگر آن‌ها سبب می‌شوند که استاتور ماشین، قاب و فونداسیون بلرزند. سطح ارتعاش بستگی به فاکتورهای زیر دارد:

۱) فرکانس و دامنه نیرو.

۲) میزان میرا کنندگی استاتور، قاب و فونداسیون.

اگر فرکانس موج نیرو با هر کدام از فرکانس‌های طبیعی برابر باشد شرایط برای یک ارتعاش و نویز سطح بالا فراهم می‌شود. در این مورد خصوصیت میرا کنندگی ساختار، سطح ارتعاش را محدود می‌کند به عبارت دیگر میرایی بیشتر معادل است با ارتعاش کمتر و بالعکس. [۱]

### ۳-۱-۲- هارمونیک‌های شار فاصله هوایی و ارتباط آن‌ها با هارمونیک-

#### های نیروهای شعاعی

برای بررسی ارتباط بین هارمونیک‌های شار فاصله هوایی و هارمونیک‌های نیروهای شعاعی ابتدا فرض می‌شود که موج مولفه شعاعی چگالی شار فاصله هوایی فاقد هارمونیک بوده و به صورت رابطه زیر بیان شود:

$$B_r(t, \varphi) = B_r \cos(\omega_{s1}t - p_n\varphi - \alpha_{s1}) \quad (9-3)$$

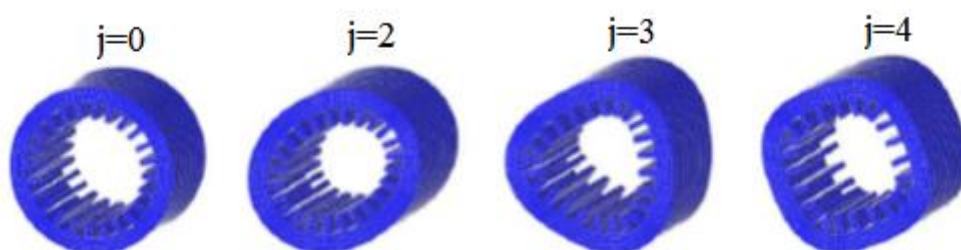
که در این رابطه،  $B_r(t, \varphi)$  نماد مولفه شعاعی چگالی شار مغناطیسی،  $B_r$  مقدار بیشینه مولفه شعاعی چگالی شار مغناطیسی و  $p_n$  تعداد جفت قطب‌های ماشین می‌باشد. در این حالت، اندازه دیفرانسیل نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور برابر است با:

$$dF_r(t, \varphi) = L \frac{B_r(t, \varphi)^2}{2\mu_0} = L \frac{B_r^2}{2\mu_0} \cos^2(\omega_{s1}t - p_n\varphi - \alpha_{s1}) = L \frac{B_r^2}{4\mu_0} (1 + \cos(2\omega_{s1}t - 2p_n\varphi - 2\alpha_{s1})) \quad (10-3)$$

مطابق با رابطه (۱۰-۳)، حتی در صورتی که شکل موج چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی سینوسی کامل و عاری از هارمونیک باشد، نیروی شعاعی حاصل حاوی هارمونیک‌هایی از مرتبه‌های صفر و دو خواهد بود. در این صورت، نیروی شعاعی حاصل اصطلاحاً شکل موج ایستاده‌ای را گرداگرد ماشین به وجود می‌آورد که همانند موج‌های ایجاد شده در تارهای یک آلت موسیقی، سبب ارتعاش پوسته ماشین و ایجاد نویز صوتی می‌گردد. شکل موج حاصل با توجه به ضریب متغیر جابجایی زاویه‌ای ( $\varphi$ ) قابل تعیین است. ضریب مزبور در روابط و مباحث مرتبط با نویز صوتی تولیدی در ماشین‌های الکتریکی نقشی اساسی داشته و معمولاً با عنوان شماره مد<sup>۱</sup> ( $j$ ) شناخته می‌شود. این ضریب تعداد

1- Mode Number

نقاط کشیدگی استاتور را تعیین می‌نماید. برای مثال، چنانچه در رابطه (۳-۱۰)، ماشین مورد استفاده دارای ۲ قطب (۱ جفت قطب) باشد، شماره مد ایجاد شده برابر با ۲ خواهد بود ( $j=2$ ). نحوه ارتعاش پوسته استاتور ماشین به ازای نیروهای شعاعی با مقادیر مختلف شماره مد، در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. مطابق با این شکل واضح است که شماره مد برابر با ۲، حاوی ۲ نقطه کشیدگی در استاتور می‌باشد.



شکل (۳-۴): نحوه ارتعاش استاتور ماشین الکتریکی به ازای نیروهای شعاعی با مقادیر مختلف شماره مد [۱۴]

در حالت کلی شکل موج چگالی شار شعاعی در فاصله هوایی ماشین الکتریکی می‌تواند حاوی هارمونیک‌های متعددی از مرتبه  $h$  ( $h=1,2,\dots$ ) باشد که هر یک از مولفه‌های هارمونیک آن مطابق با رابطه (۳-۱۱) به صورت تابعی موجی شکل از زمان و جابجایی زاویه‌ای تعریف می‌گردند. در رابطه (۳-۱۱)،  $B_h(t, \varphi)$  نشان دهنده مولفه هارمونیک مرتبه  $h$  ام بردار چگالی شار شعاعی فاصله هوایی بوده و نمادهای  $B_h$  و  $\alpha_{si}$  به ترتیب معرف اندازه و فاز هارمونیک مزبور می‌باشند. این هارمونیک‌ها سبب اضافه شدن هارمونیک‌های جدیدی به نیروهای شعاعی محاسبه شده در رابطه (۳-۱۰) خواهند شد. [۱۳] و [۱۴]

$$B_h(t, \varphi) = B_h \cos(h\omega_s t - hp_n \varphi - \alpha_{si}) \quad (۳-۱۱)$$

### ۳-۱-۳- عوامل تاثیرگذار بر ایجاد هارمونیک‌های شار فاصله هوایی

جهت بررسی عوامل تاثیرگذار بر ایجاد هارمونیک‌های مختلف شار فاصله هوایی، ابتدا اندازه چگالی شار مغناطیسی شعاعی در فاصله هوایی مطابق با رابطه (۳-۱۲) برحسب توابع موج‌های هدایت



مغناطیسی ( $\sigma$ ) و نیروی محرکه مغناطیسی ( $mmf$ ) در فاصله هوایی بیان می‌گردد.

$$B_r(t, \varphi) = mmf(t, \varphi)\sigma(t, \varphi) \quad (12-3)$$

مطابق با رابطه (۱۲-۳)، شکل موج چگالی شار مغناطیسی شعاعی در فاصله هوایی، از دو شکل موج هدایت مغناطیسی و نیروی محرکه مغناطیسی در فاصله هوایی ساخته می‌شود. در حالت کلی، در هر نقطه از فاصله هوایی، مقادیر دو کمیت یاد شده تابعی از زمان و زاویه مکانی بوده و به همین دلیل با عنوان شکل موج خوانده می‌شوند. برای مثال، در ماشین‌های با روتور قطب برجسته، با حرکت زمانی دندانه‌های روتور از مقابل شیارهای استاتور، مقدار لحظه‌ای هدایت مغناطیسی مسیر شار در هر نقطه از فاصله هوایی دچار تغییر می‌شود. همچنین، در هر لحظه، با حرکت در زوایای مکانی مختلف، مقادیر مختلفی از شار در نقاط مختلف اندازه‌گیری می‌گردد. از سوی دیگر، نیروی محرکه مغناطیسی پیرامون فاصله هوایی نیز شکل موجی را می‌سازد که نقاط بیشینه و کمینه آن با مکان قطب‌ها متناظر است. در نهایت، هارمونیک‌های شکل موج چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی با استفاده از شکل موج‌های هدایت مغناطیسی و نیروی محرکه مغناطیسی به کمک رابطه (۱۲-۳) قابل محاسبه خواهند بود.

اثر هارمونیک‌های تولید شده به وسیله دو عامل فوق، با عناوین اثر هارمونیک‌های شیار، نامیزانی و توزیع نامتقارن (غیرسینوسی) سیم‌پیچی نشان داده شده‌اند. هر یک از این عوامل در ادامه به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرند. [۱۳] و [۱۵]

### ۳-۱-۳-۱- اثر هارمونیک‌های شیار

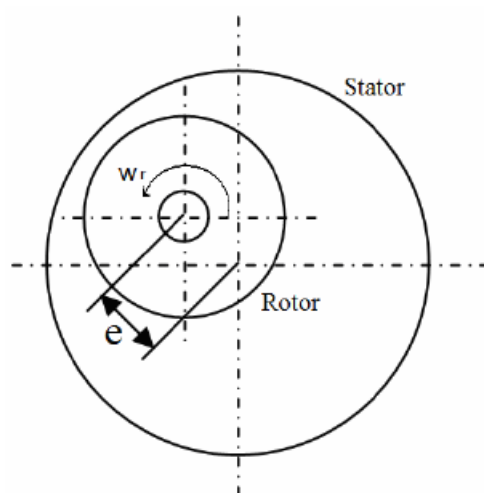
با توجه به رابطه (۱۲-۳) می‌توان مشاهده نمود که وجود هارمونیک در شکل موج هدایت مغناطیسی فاصله هوایی در اثر ساختار دندانه‌ای شکل شیارهای روتور و استاتور یکی از عوامل اصلی ایجاد هارمونیک در شکل موج چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی و نهایتاً نیروهای شعاعی وارد بر

دندانه‌های استاتور خواهد بود. با بسط رابطه (۳-۱۲) می‌توان به بررسی دقیقتر اثر هارمونیک‌های شیار در ایجاد هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی پرداخت که از حوصله این بحث خارج است. [۱۴]

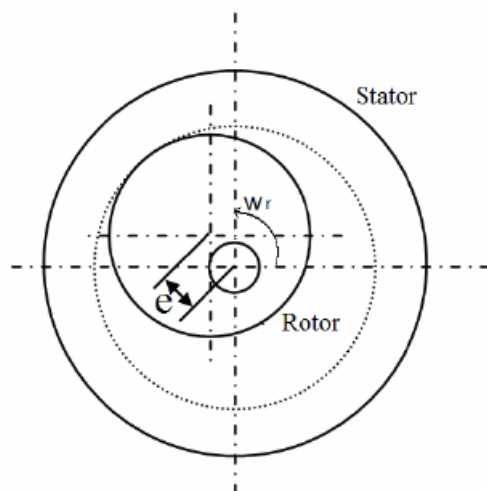
### ۳-۱-۳-۲- تأثیر نامیزانی (خروج از مرکز)

نامیزانی روتور در یک ماشین الکتریکی بدین معناست که مرکز هندسی روتور بر مرکز دایره استاتور منطبق نباشد ( شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶)). این پدیده یکی از عوامل مکانیکی ایجاد نویز می‌باشد. مطابق با این شکل‌ها دو نمونه از نامیزانی وجود دارد. در نمونه اول که نامیزانی استاتیک نامیده می‌شود، با وجود جدایی مرکز هندسی روتور از مرکز هندسی استاتور، محور چرخش روتور همچنان بر مرکز هندسی آن منطبق است ( شکل (۳-۵)). این نوع نامیزانی در اثر عواملی از قبیل بیضوی بودن استاتور بوجود می‌آید.

در نمونه دوم که از آن با عنوان نامیزانی دینامیک یاد می‌شود، محور چرخش روتور از مرکز هندسی آن جدا شده و بر نقطه دیگری انطباق می‌یابد ( شکل (۳-۶)). این نوع نامیزانی در اثر خمیدگی شفت، فرسودگی یاتاقان‌ها و... بوجود می‌آید.



شکل (۳-۵): پدیده نامیزانی استاتیک روتور



شکل (۳-۶): پدیده نامیزانی دینامیک روتور

نامیزانی نیز همچون عامل پیشین سبب می‌شود که شکل موج هدایت مغناطیسی گرداگرد فاصله هوایی ماشین حاوی هارمونیک‌هایی از مرتبه‌های مختلف باشد. [۱۶]

### ۳-۱-۳- توزیع نامتقارن (غیر سینوسی) سیم پیچی

همانگونه که در بخش پیشین اشاره شد، از دیگر عوامل ایجاد هارمونیک در شکل موج چگالی شار فاصله هوایی، غیر سینوسی بودن شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی پیرامون فاصله هوایی و وجود هارمونیک در آن است. بر این اساس، در عمل جهت حصول کمترین میزان هارمونیک، هادی‌های موجود در شیارهای مختلف گرداگرد ماشین را به گونه‌ای اتخاذ می‌نمایند تا شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی حاصل حتی‌الامکان به سینوسی ایده‌آل نزدیک باشد. اما به هر حال دستیابی به شکل موج کاملاً سینوسی برای نیروی محرکه مغناطیسی غیرممکن است. از این‌رو، هارمونیک‌های هرچند کوچک موجود در شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی فاصله هوایی سبب ایجاد هارمونیک در شکل موج چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی خواهد شد.

### ۳-۱-۴- ریپل گشتاور

یکی دیگر از عوامل الکترومغناطیسی تولید نویز در ماشین‌های الکتریکی، ریپل گشتاور می‌باشد.

معیاری برای تعیین ریپل گشتاور یک ماشین الکتریکی می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \quad (13-3)$$

که در آن  $T_{max}$ ،  $T_{min}$  و  $T_{av}$  به ترتیب مقادیر ماکزیمم، مینیمم و متوسط گشتاور الکترومغناطیسی ماشین می‌باشند. عوامل مختلفی سبب ایجاد ریپل گشتاور می‌شود. [۱۷]

مهمترین عاملی که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار می‌گیرد هارمونیک‌های موجود در Back-EMF می‌باشد. در فصل‌های بعد این موضوع به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش‌هایی برای کاهش هارمونیک‌های Back-EMF که نهایتاً منجر به کاهش ریپل گشتاور می‌شود ارائه می‌گردد.

تا اینجا عوامل الکترومغناطیسی ایجاد ارتعاشات و نویز در ماشین‌های الکتریکی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه لازم است ارتباط این نیروها با نویز ماشین مورد بررسی قرار گیرد. چگونگی انجام این کار در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.

## ۲-۳- محاسبه نویز در پاسخ به نیروهای اعمالی

درحقیقت علت اصلی ایجاد صوت در ماشین‌های الکتریکی، ارتعاش بخش‌های مختلف آن است و عوامل الکترومغناطیسی نیز با ایجاد ارتعاش سبب ایجاد نویز صوتی می‌گردند. برای مثال، اعمال نیروهای شعاعی شرح داده شده در بخش قبل بر استاتور ماشین، آن را مرتعش ساخته و این ارتعاش سبب ایجاد نویز صوتی با هارمونیک‌های مختلف می‌شود [۱۸]. یک روش محاسبه توان صوتی قابل استفاده برای عموم ماشین‌های الکتریکی به صورت زیر است [۱۹]:

$$W = 4 \cdot \sigma_{rel} \cdot \rho \cdot c \cdot \pi^3 \cdot f_{exc}^2 \cdot D_{circum}^2 \cdot R_{out} \cdot L_c \quad (14-3)$$

که در آن  $W$  توان صوتی ماشین بر حسب (W)،  $\rho$  چگالی هوا،  $c$  سرعت انتشار صوت بر حسب (m/s)،  $f_{exc}$  فرکانس تحریک بر حسب (Hz)،  $R_{out}$  شعاع خارجی استاتور بر حسب (m)،  $L_c$  طول

محوری هسته استاتور بر حسب (m) می‌باشند. همچنین  $\sigma_{rel}$  شدت نسبی صوت نامیده شده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_{rel} = \frac{k^2}{1+k^2} \quad (15-3)$$

که در آن  $k$  برابر است با:

$$k = \frac{2\pi R_{out} f_{exc}}{c} \quad (16-3)$$

همچنین  $D_{circum}$  نشان دهنده دامنه انحرافات یا جابجایی ماده بر حسب  $m$  به ازای نیروی اعمال شده می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_{circum} = \frac{12F_{rad}R_m \left(\frac{R_m}{h_s}\right)^3}{j^4 E \sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f_{exc}}{f_m}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{\delta}{\pi} \frac{f_{exc}}{f_m}\right)^2}} \quad (17-3)$$

که در آن  $F_{rad}$  مقدار نیروی شعاعی وارد شده بر دندان استاتور بر حسب (N)،  $f_m$  فرکانس طبیعی ساختار ماشین بر حسب (Hz)،  $R_m$  شعاع متوسط یوغ استاتور بر حسب (m)،  $h_s$  ارتفاع یا طول شعاعی قطب‌های برجسته استاتور بر حسب (m)،  $j$  شماره مدها،  $E$  ضریب کشسانی می‌باشد. همچنین  $\delta$  میزان کاهش لگاریتمی ارتعاشات می‌باشد که بر حسب تغییرات ضریب میرا کننده به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\delta = 2\pi\zeta \quad (18-3)$$

در این رابطه  $\zeta$  ضریب میرا کننده می‌باشد و توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\zeta = \frac{c}{\sqrt{4KM}} \quad (۱۹-۳)$$

پارامترهای  $M$  و  $K$  به ترتیب جرم و ضریب سختی می‌باشند.

فصل چہارم : طراحی ماشین TFPM قطب

چنگالی نمونہ

## ۴-۱- مقدمه

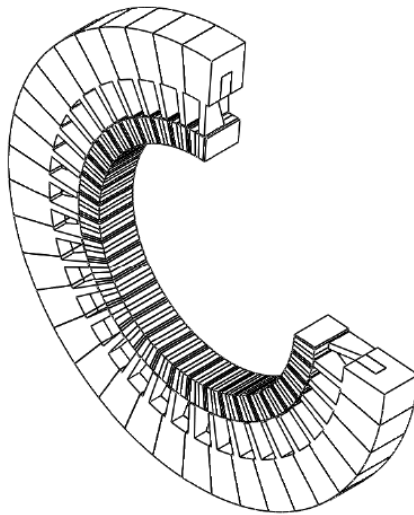
ماشین‌های TFPM به عنوان ماشین‌های با چگالی گشتاور بالا شهرت یافته‌اند. این ماشین‌ها می‌توانند در مواردی که محدودیت فضا وجود دارد و یا نیاز به راندمان بالایی می‌باشد (نظیر زیردریایی‌ها که نیاز است مدت زمان زیادی زیر سطح آب باشند) به کار روند. ساختارهای مختلفی برای ماشین‌های TFPM ارائه شده که از آن جمله می‌توان ماشین‌های TFPM با هسته U شکل، با هسته C شکل، با هسته E شکل و ماشین‌های TFPM قطب چنگالی را نام برد [۲۰]. در مراجع، ساختار قطب چنگالی، به عنوان بهترین ساختار در بین ماشین‌های TFPM از لحاظ چگالی گشتاور ذکر شده است [۲۱]. البته این موضوع همانند دیگر ماشین‌ها به نحوه طراحی و محدودیت‌ها وابسته است، ضمن اینکه ماشین TFPM و مخصوصاً ساختار قطب چنگالی آن، به صورت بسیار محدودی در مقالات معتبر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین هر گونه قضاوت قاطع در مورد عملکرد ماشین باید با توجه به طراحی بهینه، محاسبه و ملاحظه رفتار ماشین صورت گیرد. یکی از محققانی که در زمینه ماشین‌های TFPM، و مخصوصاً ساختار قطب چنگالی این ماشین، فعالیت زیادی داشته است آقای مسمودی<sup>۱</sup> است [۲۲]. تقریباً تمام الگوریتم استخراج و تشریح شده در تعداد بسیار محدود مقالات برای ساختار قطب چنگالی ماشین TFPM، از کارهای ایشان اقتباس شده است. به هر حال بررسی و تحلیل دقیق این الگوریتم و مشاهده نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده به روش اجزاء محدود، نشان می‌دهد که الگوریتم طراحی و ساختار ارائه شده دارای اشکالاتی است. بنابراین در این فصل، پس از معرفی ساختار ارائه شده در مقالات، اشکالات این ساختار و پیشنهادهای اصلاحی مطرح می‌شوند و ماشینی با ساختار اصلاح شده ارائه می‌گردد.

شکل (۴-۱) بخشی از ساختار یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی که بر طبق الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲۲] طراحی شده است را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۴-۱) نشان داده

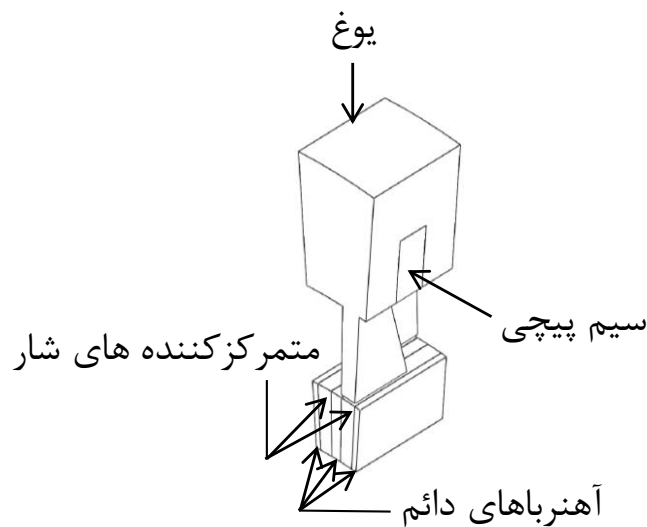
1- Ahmed Masmoudi



شده است، هر فاز از کنار هم قرار گرفتن تعدادی جفت قطب تشکیل می‌شود. ساختار یک جفت قطب ماشین در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، روتور از تعدادی متمرکزکننده شار و آهنربای دائم تشکیل شده است بطوریکه یک متمرکزکننده شار در بین هر دو آهنربا قرار گرفته است و شار حاصل از دو آهنربا با عبور از این متمرکزکننده وارد فاصله هوایی می‌شود. این شار پس از وارد شدن به پایه استاتور و دور زدن سیم‌پیچ و عبور از هسته استاتور از طریق پایه‌های مجاور وارد فاصله هوایی و نهایتاً وارد متمرکزکننده شار در زیر پایه‌های مجاور می‌شود.

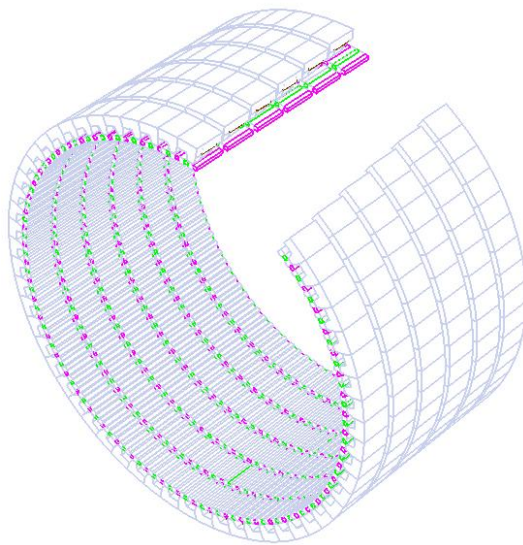


شکل (۱-۴): بخشی از ساختار یک فاز ماشین TFPM قطب چنگالی



شکل (۲-۴): ساختار یک جفت قطب ماشین TFPM قطب چنگالی

با قرار گرفتن فازها در کنار هم و در راستای محور ماشین، شکل چند فاز ماشین بدست می‌آید. البته برای شکل چند فاز ماشین پیشنهادهایی هم در مراجع داده شده است. به عنوان مثال برای کاهش ریپل گشتاور می‌توان از شیفت فازها استفاده کرد. این کار می‌تواند به دو صورت انجام گیرد: در روش اول استاتورها در کنار هم حول یک محور و به اندازه  $360/m$  درجه الکتریکی نسبت به یکدیگر شیفت یافته قرار می‌گیرند که در این رابطه  $m$  تعداد فازهای ماشین می‌باشد این در حالی است که روتورها در یک راستا هستند. روش دوم عکس عمل روش اول انجام می‌شود. در این روش استاتورها در یک راستا هستند ولی روتور هر فاز نسبت به فاز دیگر به اندازه  $360/m$  شیفت داده می‌شود. همچنین برای اینکه شار نشتی بین فازها بوجود نیاید از یک ماده غیر مغناطیسی مانند آلایژ آلومینیوم در بین فازها استفاده می‌شود [۲۳]. ساختار شش فاز ماشین در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. در این ساختار استاتور هر یک از فازها نسبت به هم شیفت داده شده‌اند.



شکل (۳-۴): ساختار شش فاز ماشین TFPM قطب چنگالی طراحی شده

## ۲-۴ - بررسی اشکالات ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی

### ارائه شده در مراجع و ارائه اصلاحات ساختاری

در بخش قبل ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی ارائه شده در مقالات به صورت کامل معرفی شد. در این بخش اشکالات این ساختار بررسی شده و روش‌هایی برای اصلاح این اشکالات ارائه می‌شود.

اولین موضوعی که می‌توان بر روی آن بحث نمود، این است که در الگوریتم ارائه شده در مقالات ولتاژ فاصله هوایی و ولتاژ ورودی با هم برابر در نظر گرفته شده‌اند. به عبارت دیگر از مقاومت و راکتانس ناشی صرف‌نظر شده است. اما معمولاً مقدار امپدانس ناشی در ماشین‌های TFPM متداول قابل توجه است و نمی‌توان در تمامی طرح‌ها به راحتی از آن صرف‌نظر کرد. همچنین با توجه به مرجع [۲۲]، در این ساختار در ناحیه‌ای که پایه‌های استاتور هم‌پوشانی دارند بین آن‌ها شار ناشی قابل توجهی وجود دارد.

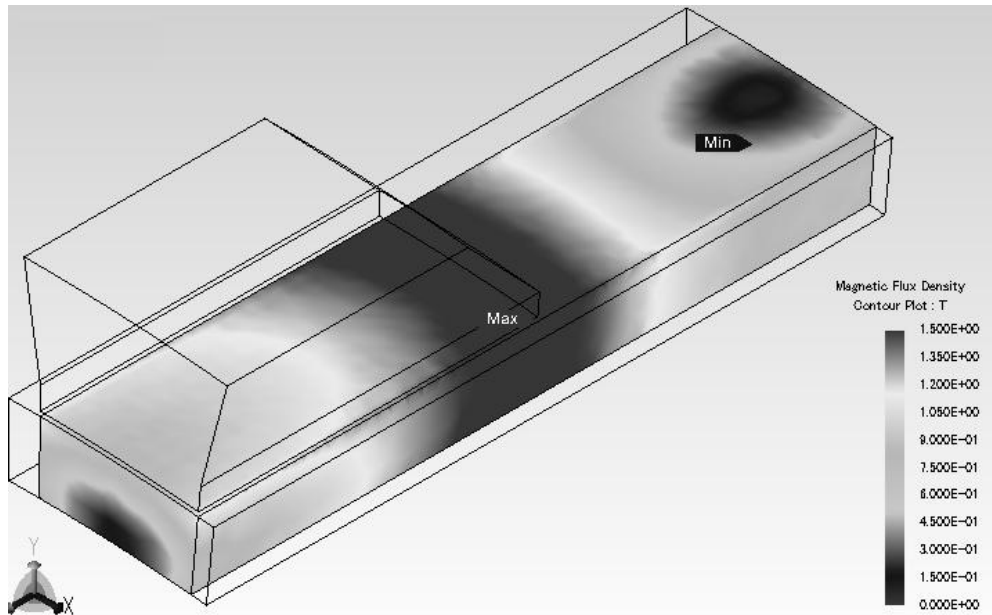
مشکل دیگری که در ارتباط با الگوریتم طراحی ارائه شده در این مرجع وجود دارد این است که در مرجع [۲۲] رابطه‌ای برای تعیین زاویه کمان آهنرباهای دائم و زاویه کمان متمرکزکننده‌های شار ارائه نشده است که این مسئله امکان طراحی ماشینی با این الگوریتم را عملاً غیر ممکن می‌کند.

مهمترین مشکلی که ارتباط تنگاتنگی با موضوع این پایان‌نامه نیز دارد مسئله اشباع می‌باشد. به علت اینکه تمامی شار دو آهنربای مجاور هر متمرکزکننده شار، باید از درون آن متمرکزکننده عبور کند و وارد فاصله هوایی شود، در بعضی از نقاط، متمرکزکننده شار و نوک پایه‌های استاتور با پدیده اشباع روبرو می‌شوند. با شبیه‌سازی ماشین ارائه شده در مرجع [۲۲] می‌توان این موضوع را بررسی کرد. شکل (۴-۴) این موضوع را به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود، نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود بعضی از نقاط متمرکزکننده شار و نوک پایه‌های استاتور دچار اشباع می‌شود ضمن

اینکه بخش‌هایی از متمرکزکننده شار بدون استفاده موثر از آهن دارای شار بسیار پایین می‌باشد.

رویکرد اصلی مراجع برای تعیین ابعاد هسته استاتور این بوده است که با در نظر گرفتن چگالی شار ماکزیمم مجاز (اشباع)، سطح مقطع‌ها در مسیر شار به گونه‌ای باشند که چگالی شار در بخش‌های مختلف ماشین از مقدار ماکزیمم مجاز تجاوز نکند و کمتر بودن مقدار آن در بعضی قسمت‌ها اشکالی ندارد. این امر سبب می‌شود که از کل هسته به صورت بهینه استفاده نشود و بخش مرده و یا بلااستفاده هسته افزایش یابد. ضمن اینکه حجم و یا وزن مواد بکار رفته و در نتیجه هزینه افزایش می‌یابد. در ساختار ارائه شده در مراجع مساحت سطح مقطع پایه‌های استاتور در امتداد شعاع با افزایش شعاع، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هر چه از قطر داخلی پایه‌ها به قطر خارجی آن نزدیک‌تر می‌شویم، چگالی شار بیشتر شده و در نتیجه ممکن است هسته وارد ناحیه اشباع شود که این مسئله به وضوح در مرجع [۲۲] نشان شده است.

پدیده اشباع باعث کاهش راندمان ماشین می‌شود. از طرفی این پدیده بطور کلی باعث افزایش نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور می‌شود که این مسئله می‌تواند سبب افزایش ارتعاشات و نویز ماشین شود. بنابراین ابتدا باید روابطی برای تعیین ابعاد متمرکزکننده‌های شار و آهنرباهای دائم ارائه شود و سپس اصلاحاتی در ساختار ارائه شده در مرجع [۲۲] جهت کاهش شار نشتی و جلوگیری از به اشباع رفتن پایه‌ها و متمرکزکننده‌های شار انجام داد.

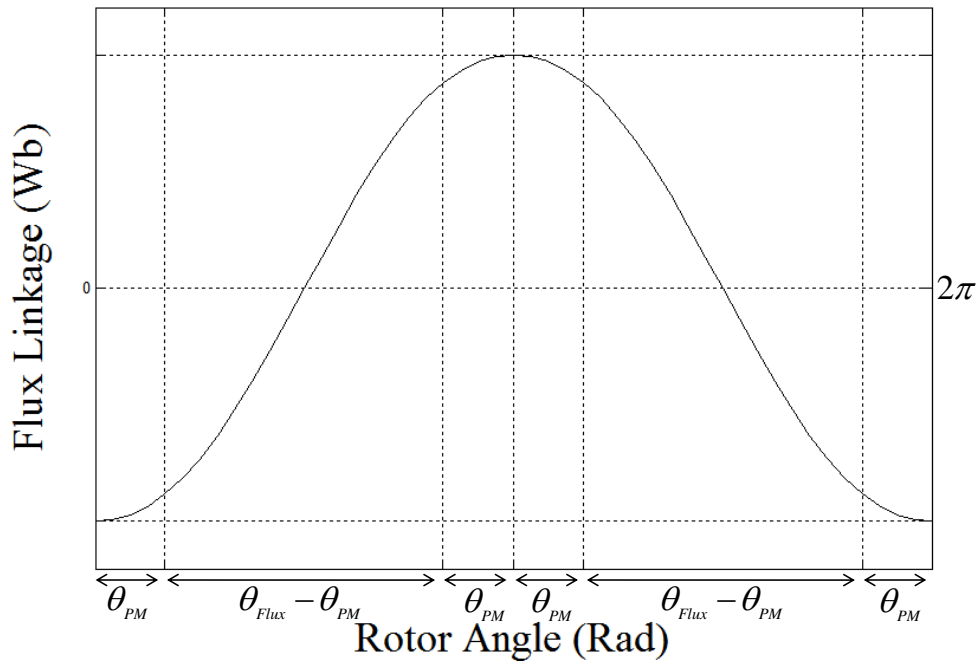


شکل (۴-۴): نمونه‌ای از توزیع چگالی شار در متمرکزکننده شار پیشنهاد شده در مراجع

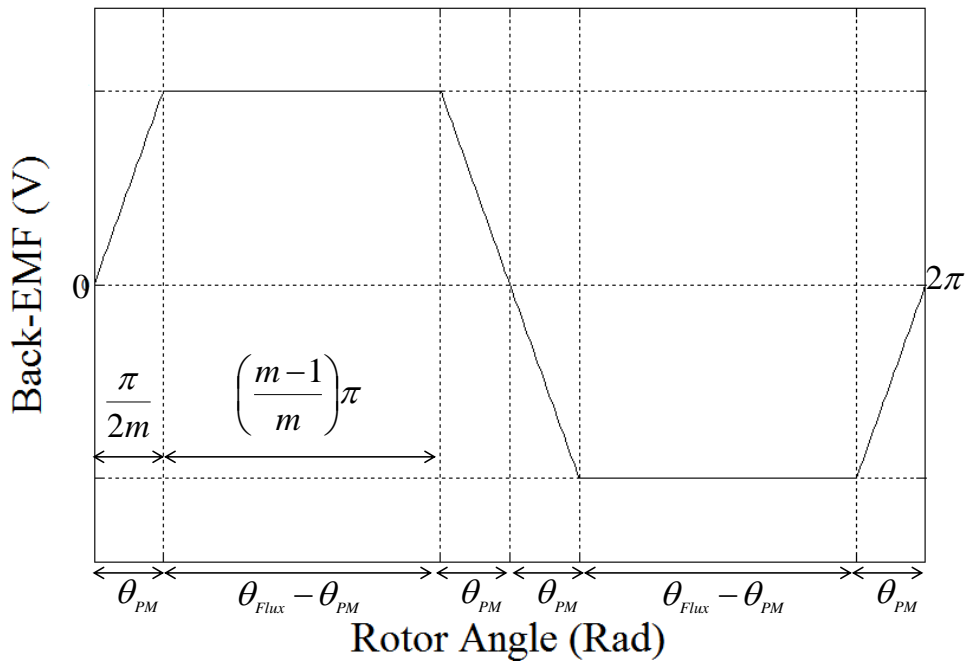
## ۳-۴- ارائه روابط ابعادی برای آهنرباهای دائم و متمرکزکننده-

### های شار

شار پیوندی سیم‌پیچ استاتور بستگی به موقعیت روتور دارد و با چرخش روتور به دلیل تغییر رلوکتانس فاصله هوایی، شار پیوندی سیم‌پیچی تغییر می‌کند. هنگامی که متمرکزکننده شار در مقابل پایه استاتور قرار می‌گیرد شار پیوندی ماکزیمم مقدار را خواهد داشت و نرخ تغییرات آن صفر خواهد بود. برای یک ماشین با Back-EMF دوزنقه‌ای، شار پیوندی سیم‌پیچ به صورت شکل (۴-۵) خواهد بود. با مشتق‌گیری از این شکل، Back-EMF ماشین مطابق شکل (۴-۶) بدست می‌آید.



شکل (۴-۵): شار پیوندی سیم‌پیچ استاتور بر حسب موقعیت روتور



شکل (۴-۶): تغییرات ولتاژ القایی ماشین بر حسب موقعیت روتور

با توجه به تغییرات شار پیوندی، زاویه الکتریکی کمان متمرکزکننده شار و آهنربای دائم در هر

قطب به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\theta_{Flux} = \frac{\pi}{(1 + K_m)} \quad (1-4)$$

$$\theta_{PM} = \frac{K_m \pi}{(1 + K_m)} \quad (2-4)$$

که در این روابط  $\theta_{Flux}$  و  $\theta_{PM}$  به ترتیب زاویه کمان متمرکزکننده شار و زاویه کمان آهنربای دائم است. پارامتر  $K_m$  که در واقع نسبت زاویه کمان آهنرباهای دائم به زاویه کمان متمرکزکننده‌های شار می‌باشد، برای یک ماشین  $m$  فاز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_m = \frac{1}{2m - 1} \quad (3-4)$$

با طراحی متمرکزکننده‌های شار و آهنرباهای دائم توسط روابط فوق ماشینی با Back-EMF غیر سینوسی که می‌توان آنرا با شکل موج دوزنقه‌ای تخمین زد حاصل می‌شود. برای طراحی ماشین با Back-EMF سینوسی، رابطه (3-4) دیگر صحیح نمی‌باشد و باید مقدار بهینه  $K_m$  توسط نرم افزار اجزاء محدود بدست آید.

برای تعیین طول شعاعی آهنربای دائم و متمرکزکننده شار باید نقطه کار آهنربای دائم تعیین شود. با توجه به منحنی تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی مربوط به ربع دوم یک آهنربای دائم می‌توان نوشت:

$$H_m = (B_r - B_m) \times \frac{H_c}{B_r} \quad (4-4)$$

که در این رابطه  $B_m$  و  $H_m$  به ترتیب چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در نقطه کار آهنربای دائم می‌باشد.  $B_r$  و  $H_c$  به ترتیب چگالی شار پسماند و نیروی مغناطیس زدا می‌باشد.

با اعمال قانون آمپر خواهیم داشت:

$$H_m l_{pm} = 2H_g g(1 + K_r) \quad (5-4)$$

که در این رابطه  $l_{pm}$  طول متوسط آهنربا،  $g$  طول فاصله هوایی،  $H_g$  شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی و  $K_r$  نسبت افت نیروی محرکه مغناطیسی روی هسته‌ها به افت آن در فاصله هوایی می‌باشد.

با جایگذاری رابطه (۴-۵) در (۴-۴)، نقطه کار آهنربای دائم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$B_m = B_r - \frac{2B_g B_r g(1 + K_r)}{\mu_0 l_{pm} H_c} \quad (۴-۶)$$

که در این رابطه  $\mu_0$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا می‌باشد. همچنین  $B_g$  چگالی شار متوسط در فاصله هوایی می‌باشد و توسط رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$B_g = \frac{K_{co} \times B_{cs}}{1 + K_m} \quad (۴-۷)$$

که در این رابطه  $B_{cs}$  چگالی شار ماکزیمم هسته،  $K_{co}$  درصد پوشش متمرکزکننده شار توسط پایه استاتور می‌باشد.

با توجه به اینکه شار خارج شونده از هر متمرکز کننده شار از مجموع شار دو آهنربای مجاور آن تشکیل شده است خواهیم داشت:

$$2(1 - K_{lpm})A_{pm}B_m = A_g B_g \quad (۴-۸)$$

که در این رابطه  $A_g$ ،  $A_{pm}$ ،  $B_m$  و  $K_{lpm}$  به ترتیب مساحت سطح مجاور به فاصله هوایی متمرکزکننده شار، مساحت سطح اتصال آهنربای دائم و متمرکزکننده شار، چگالی شار آهنربای دائم بر روی سطح اتصال آن به متمرکزکننده شار و ضریب نشت شار آهنربای دائم می‌باشد. با محاسبه  $A_g$  و  $A_{pm}$  طول شعاعی آهنربای دائم به صورت زیر بدست می‌آید:



$$H_{pm} = \frac{\pi B_g \left( \frac{D_g}{2} - g \right)}{2 p_n B_m (1 - K_{lpm})} \quad (9-4)$$

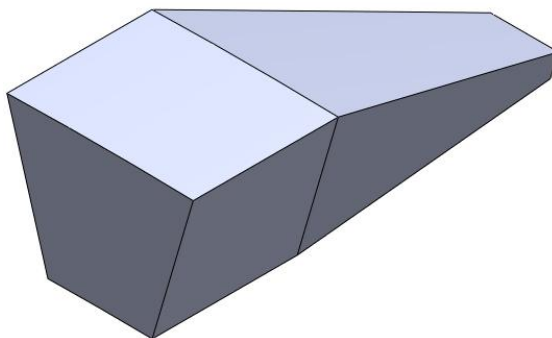
$H_{pm}$  طول شعاعی آهنربای دائم و  $p_n$  تعداد جفت قطب‌های ماشین می‌باشد.

#### ۴-۴- ارائه ساختاری جدید برای پایه‌های استاتور

اگر چگالی شار هسته تقریباً یکنواخت و تا حد امکان بزرگ و کمتر از مقدار اشباع توسط طراح انتخاب شود بخش مرده و یا بلااستفاده هسته حداقل می‌شود. برای رسیدن به این هدف باید سطح مقطع هسته در طول مسیر شار ثابت بماند. باید توجه داشت که در هنگام تلاش برای دستیابی به توزیع شار یکنواخت در هسته استاتور، نباید از شار نشتی غافل شد. در هنگام طراحی، شارهای نشتی با اعمال یک سری ضرایب که با تحلیل اجزاء محدود بدست می‌آیند، در نظر گرفته می‌شوند. در مرجع [۲۲]، از اثرات شار نشتی در استخراج الگوریتم صرف نظر شده است که این چشم پوشی در اغلب موارد منجر به نتایج غیر قابل قبول می‌شود.

ساختار پیشنهادی برای پایه‌های استاتور در شکل (۷-۴) نشان داده شده است. در این ساختار، زاویه‌ای که توسط سطح مجاور به فاصله هوایی پایه استاتور پوشش داده می‌شود برابر با  $\theta_{Flux}$  و زاویه‌ای که توسط صفحه بالایی پایه در ناحیه اتصال به یوغ پوشش داده می‌شود برابر با گام قطب یعنی  $\theta_{PM} + \theta_{Flux}$  می‌باشد. در این ساختار طول پایه استاتور توسط روابط ریاضی به گونه‌ای محاسبه می‌شود که سطح مقطع عمود بر مسیر شار ثابت بماند که توضیح بیشتر آن از حوصله این بحث خارج است.

چنانچه از شکل (۷-۴) مشاهده می‌شود در ساختار اصلاح شده عرض پایه‌ها در راستای محور کاهش پیدا می‌کند. این امر سبب افزایش فاصله بین پایه‌ها و کاهش شار نشتی بین آن‌ها می‌شود.

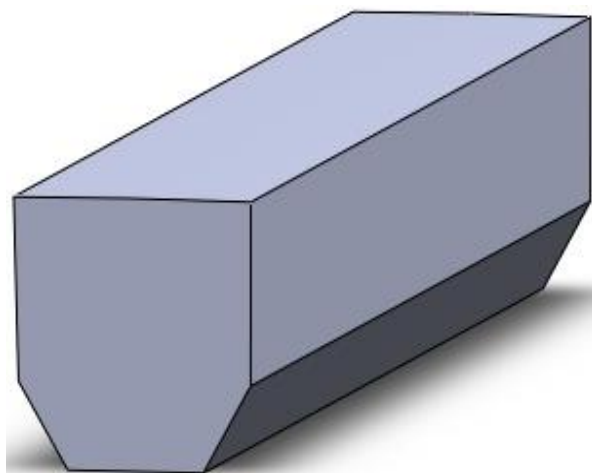


شکل (۷-۴): ساختار پیشنهادی برای پایه‌های استاتور

## ۴-۵- ساختار پیشنهادی جهت جلوگیری از به اشباع رفتن

### متمرکزکننده شار

شبه‌سازی‌های بسیار نشان می‌دهد که مشکل به اشباع رفتن متمرکزکننده شار را می‌توان با اصلاح شکل متمرکزکننده شار در حد امکان مرتفع کرد. این کار با امتداد متمرکزکننده شار به بخش مرکزی روتور و برجسته کردن آن در طرف داخلی تحقق می‌یابد. ساختار پیشنهادی برای متمرکزکننده شار در شکل (۸-۴) نشان داده شده است. در واقع با این تغییر ساختاری، مسیری موازی در قسمت زیرین متمرکزکننده شار ایجاد شده است و بخشی از شار دو آهنربای دائم از طریق این مسیر وارد پایه‌های استاتور می‌شوند. به دلیل داشتن فضای کافی در بخش داخلی روتور، نیازی به توصیف روابط و یا قواعد خاص برای انتخاب ابعاد بخش داخلی متمرکزکننده شار وجود ندارد، بلکه با تغییر ابعاد فرو رفته در بخش داخلی روتور شرایطی را باید بوجود آورد تا متمرکزکننده شار دچار پدیده اشباع نشود. شکل بهینه باید با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در محیط اجزاء محدود بدست آید. بدین صورت که اولاً در هیچ نقطه‌ای از متمرکزکننده شار اشباع رخ ندهد و ثانیاً باعث افزایش ارتعاشات و نویز ماشین نشود. بنابراین به ازای هر تغییری در ابعاد بخش اضافه شده باید ماشین در محیط اجزاء محدود شبه‌سازی شده و توزیع چگالی شار در بخش‌های مختلف و ارتعاشات آن بررسی شود.



شکل (۴-۸): متمرکزکننده شار جهت جلوگیری از پدیده اشباع

## ۴-۶- طراحی ماشین نمونه

اکنون با توجه به توضیحات داده شده ماشین نمونه‌ای با در نظر گرفتن Back-EMF به صورت سینوسی مورد طراحی و بررسی قرار می‌گیرد.

### ۴-۶-۱- تعیین ابعاد ماشین نمونه

برای تعیین ابعاد ماشین ابتدا باید پارامترهای اصلی خواسته شده مشخص شوند. این پارامترها معمولاً با توجه به سفارش کارفرما و محدودیت‌های موجود تعیین می‌شوند. مقادیر این پارامترها در جدول (۴-۱) داده شده است.

جدول (۴-۱): پارامترهای اصلی خواسته شده

| ردیف | نام پارامتر          | نماد پارامتر | مقدار پارامتر     |
|------|----------------------|--------------|-------------------|
| ۱    | توان خروجی           | $P_{out}$    | ۳ کیلو وات        |
| ۲    | سرعت چرخش            | $n_s$        | ۲۰۰۰ دور در دقیقه |
| ۳    | مقدار موثر ولتاژ فاز | $V_{in}$     | ۲۷۰ ولت           |

در جدول (۴-۲) برخی از پارامترهای انتخابی و پارامترهای بدست آمده از روش اجزاء محدود داده

شده‌اند. در این جدول مقدار ضرایب شار نشتی بین قسمت‌های مختلف به کمک نرم افزار اجزاء محدود تعیین شده است.

جدول (۲-۴): پارامترهای انتخابی و پارامترهای به دست آمده از روش اجزاء محدود برای طراحی ماشین نمونه

| ردیف | نام پارامتر                                    | نماد پارامتر  | مقدار پارامتر           |
|------|------------------------------------------------|---------------|-------------------------|
| ۱    | تعداد فازها                                    | $m$           | ۶                       |
| ۲    | تعداد دور سیم‌پیچ هر فاز                       | $N_t$         | ۱۰۰ دور                 |
| ۳    | چگالی شار ماکزیمم هسته                         | $B_{cs}$      | ۱/۲ تسلا                |
| ۴    | فرکانس ورودی                                   | $f$           | ۲۰۰ هرتز                |
| ۵    | بازده                                          | $\eta$        | ۰/۹                     |
| ۶    | طول فاصله هوایی                                | $g$           | ۰/۵ میلی‌متر            |
| ۷    | چگالی جریان هادی                               | $J_s$         | ۶ آمپر بر میلی‌متر مربع |
| ۸    | ضریب پخشندگی مس                                | $K_{cu}$      | ۰/۴۵                    |
| ۹    | درصد پوشش متمرکزکننده شار توسط کفشک قطب        | $K_{co}$      | ۶۲/۵ درصد               |
| ۱۰   | نسبت طول محوری شیار به طول محوری هر فاز        | $K_s$         | ۰/۴                     |
| ۱۱   | نسبت طول محوری مؤثر موتور به قطر داخلی استاتور | $K_L$         | ۰/۱۶۳                   |
| ۱۲   | ضخامت پاشنه کفشک قطب استاتور                   | $d_{shoe}$    | ۵ میلی‌متر              |
| ۱۳   | ضخامت عایق بین شیار و سیم‌پیچ                  | $l_{ins}$     | ۱ میلی‌متر              |
| ۱۴   | ضریب نشت شار مگنت‌ها در روتور                  | $K_{lpm}$     | ۰/۴                     |
| ۱۵   | ضریب نشت شار مگنت‌ها در دندانه‌های استاتور     | $K_{l-tooth}$ | ۰/۱                     |
| ۱۶   | ضریب نشت شار مگنت‌ها در هسته استاتور           | $K_{l-core}$  | ۰/۰۳۵                   |
| ۱۷   | ضریب افت mmf مگنت‌ها در هسته                   | $K_r$         | ۰/۴۵                    |

برای تعیین ابعاد ماشین با توجه به توضیحات داده شده در صفحات قبل برنامه‌ای در محیط نرم افزار متلب نوشته شده که با اجرای این برنامه، مقادیر بهینه ماشین مطابق با جدول (۳-۴) بدست می‌آید.

هدف در برنامه بهینه‌سازی نوشته شده رسیدن به چگالی توان ماکزیمم می‌باشد.

جدول (۳-۴): ابعاد هندسی ماشین طراحی شده

| ردیف | نام پارامتر                                  | نماد     | مقدار          |
|------|----------------------------------------------|----------|----------------|
| ۱    | قطر داخلی روتور                              | $D_{ir}$ | ۱۳۹/۹ میلی‌متر |
| ۲    | طول شعاعی آهنربای دائم                       | $H_{pm}$ | ۱۷/۴۵ میلی‌متر |
| ۳    | قطر داخلی استاتور                            | $D_g$    | ۱۷۵/۸ میلی‌متر |
| ۴    | طول شعاعی پایه (دندان) استاتور               | $d_{os}$ | ۹/۳۴ میلی‌متر  |
| ۵    | طول شعاعی شیار استاتور                       | $d_{ws}$ | ۲۲/۱ میلی‌متر  |
| ۶    | طول شعاعی یوغ استاتور (عمق هسته پشت سیم‌پیچ) | $d_{cs}$ | ۳/۹۴ میلی‌متر  |
| ۷    | طول محوری هر فاز استاتور                     | $L$      | ۲۸/۷ میلی‌متر  |
| ۸    | طول محوری شیار استاتور                       | $L_{ss}$ | ۱۱/۵ میلی‌متر  |
| ۹    | قطر خارجی هسته استاتور                       | $D_o$    | ۲۵۶/۵ میلی‌متر |

جهت بررسی ماشین به روش اجزاء محدود نیاز است تا مدلی ۲ بعدی و یا ۳ بعدی از ماشین رسم شود. به دلیل ساختار پیچیده ماشین نمی‌توان آنرا به صورت ۲ بعدی تحلیل کرد و حتما باید به صورت ۳ بعدی رسم و به روش اجزاء محدود رفتار ماشین را تجزیه و تحلیل کرد. برای ترسیم هندسه ماشین مورد نظر می‌توان به کمک امکانات ترسیمی خود نرم‌افزارهای اجزاء محدود و یا نرم‌افزارهای تخصصی ترسیم، مثل Solidworks، استفاده کرد. در این اینجا از نرم‌افزار Solidworks، برای ترسیم هندسه ماشین استفاده می‌شود سپس با وارد کردن هندسه ترسیم شده در محیط نرم افزار JMAG Designer، به تحلیل الکترومغناطیسی آن پرداخته می‌شود.

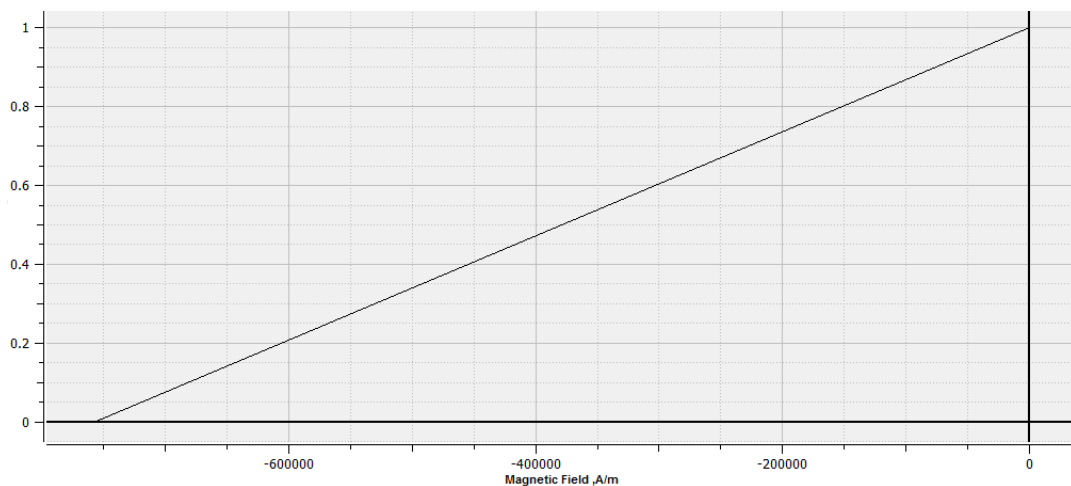
## ۴-۶-۲- انتخاب مواد سازنده برای قسمت‌های اکتیو ماشین

با توجه به شکل (۴-۱) هر فاز از تعدادی جفت قطب تشکیل شده است بطوریکه می‌توان با

مدل کردن تنها یک جفت قطب به جای یک فاز در تحلیل الکترومغناطیسی استفاده کرد. این کار سبب صرفه‌جویی در زمان و کاهش حجم محاسبات می‌شود. پس از ترسیم هندسه ماشین باید ماده سازنده هر قسمت را به آن اختصاص داد. این کار با توجه به جدول (۴-۴) انجام می‌شود. همچنین منحنی BH آهنربای دائم در شکل (۹-۴) داده شده‌اند. با توجه به این شکل، چگالی شار پسماند و نیروی مغناطیس‌زدا به ترتیب  $B_r = 1 \text{ T}$  و  $H_c = 757250 \frac{\text{A}}{\text{m}}$  در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۴-۴): مشخصات مواد سازنده بخش‌های اکتیو موتور

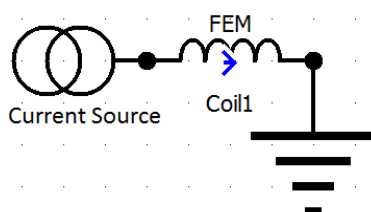
| مشخصات الکتریکی                                               | مشخصات مغناطیسی                                                 | نوع ماده                          | قطعه         |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| -                                                             | -                                                               | (Somaloy500+0/5% Kenolube_800MPa) | هسته استاتور |
| -                                                             | -                                                               | (Somaloy500+0/5% Kenolube_800MPa) | هسته روتور   |
| هدایت الکتریکی:<br>$700000 \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$   | $B_r = 1 \text{ T}$<br>$H_c = 757250 \frac{\text{A}}{\text{m}}$ | NdFeB                             | آهنربا       |
| هدایت الکتریکی:<br>$59772863 \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$ | $\mu_r = 1$                                                     | مس                                | سیم‌پیچی     |



شکل (۹-۴): منحنی BH آهنربای دائم در ربع دوم

#### ۴-۶-۳- اختصاف تغذیه

از آنجائی که در این ماشین هر یک از فازها نسبت به یکدیگر مستقل هستند و اندوکتانس متقابل بین فازها وجود ندارد در مدار معادل ماشین هم که معادلات آن به صورت همزمان با معادلات روش اجزاء محدود حل می شود تنها اندوکتانس خودی مربوط به یک فاز در نظر گرفته می شود. شماتیک این مدار در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. در بخش های بعد این مدار معادل به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل (۴-۱۰): مدار تغذیه استاتور

با توجه به شکل (۴-۱۰) از یک منبع جریان برای تغذیه ماشین استفاده شده است. این منبع جریان می تواند دارای هر شکل موج جریان دلخواهی باشد. بدین صورت که با مدلسازی دینامیکی گذرایی ماشین در محیط متلب، جریان عبوری از سیم پیچ ها را تحت شرایط مختلف بدست آورد و با اعمال این جریان به ماشین در محیط اجزاء محدود به بررسی رفتار ماشین پرداخت. اما در اینجا تنها نیاز است که ماشین را تحت شرایط مدار باز بررسی کرد بنابراین مقدار منبع جریان صفر فرض می شود.

#### ۴-۶-۴- اعمال شرایط مرزی

برای اینکه بتوان با شبیه سازی یک جفت قطب، سیستم را مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار داده و نتایج را بدست آورد نیاز به اعمال شرایط مرزی می باشد. این شرایط مرزی شامل شرایط مرزی تکرار و شرایط مرزی عایق مغناطیسی است. با توجه به اینکه سیستم متقارن است و یک فاز از کنار

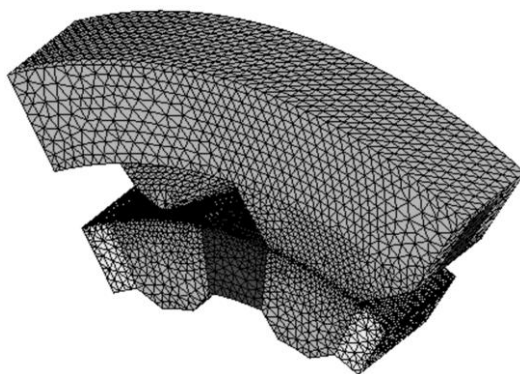
هم قرار گرفتن تعداد مشخصی جفت قطب تشکیل شده است برای تعمیم یک جفت قطب به یک فاز از شرط مرزی تکرار استفاده می‌شود. از شرط مرزی عایق مغناطیسی برای مشخص کردن اینکه شار نشتی تا چه فاصله‌ای در خارج از ماشین پراکنده می‌شود و یا به عبارت دیگر برای مشخص کردن مرز محدوده‌ای که در آن میدان مغناطیسی وجود ندارد استفاده می‌شود. این شرط مرزی می‌تواند به سطحی که با یک فاصله در خارج ماشین، ماشین را در بر می‌گیرد و شار از آن خارج نخواهد شد اعمال شود. بر روی این سطح فقط مولفه مماسی چگالی شار وجود دارد و مولفه عمودی شار مغناطیسی بر روی آن صفر است. اندازه این ناحیه وابسته به ساختار موتور با داشتن اندک تجربه‌ای از تحلیل اجزاء محدود می‌تواند با یک دقت قابل قبول تعیین شود.

#### ۴-۶-۵- مش بندی

از جمله عواملی که تاثیر زیادی بر دقت جواب‌های بدست آمده می‌گذارد مش بندی می‌باشد. مش بندی با مش‌های بزرگ باعث پایین آمدن دقت و افزایش خطا در جواب‌های حاصله شده و چنانچه مش بندی بیش از اندازه ریز باشد باعث افزایش زمان حل مسئله می‌گردد. مش بندی باید به گونه‌ای انجام شود که در نقاطی که چگالی شار دارای تغییرات زیادی است مش‌ها ریز و در نقاطی که تغییرات چگالی شار کم است مش‌ها درشت‌تر باشند. برای انجام این کار باید درک صحیح از نحوه توزیع چگالی شار در داخل ماشین داشت. به عنوان مثال در ناحیه یوغ استاتور مش بندی می‌تواند درشت‌تر باشد اما قسمت‌هایی از ماشین که نزدیک فاصله هوایی قرار دارند، باید دارای مش بندی ریز باشند.

شکل (۴-۱۱) یک مش بندی مناسب انجام شده بر روی موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده را نشان می‌دهد.



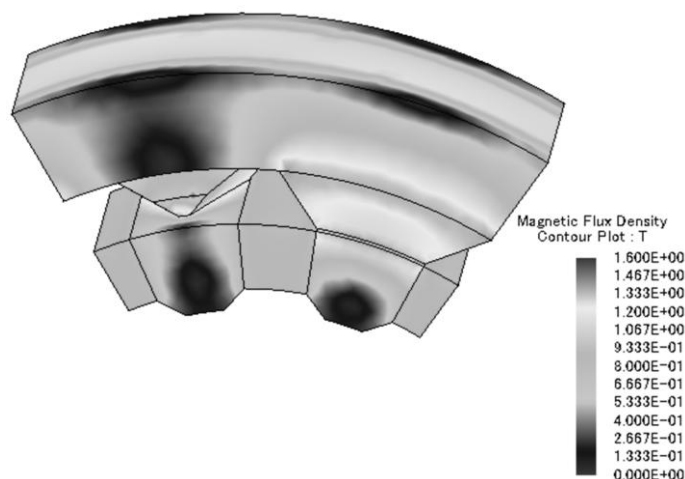


شکل (۱۱-۴): مش بندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور TFPM طراحی شده

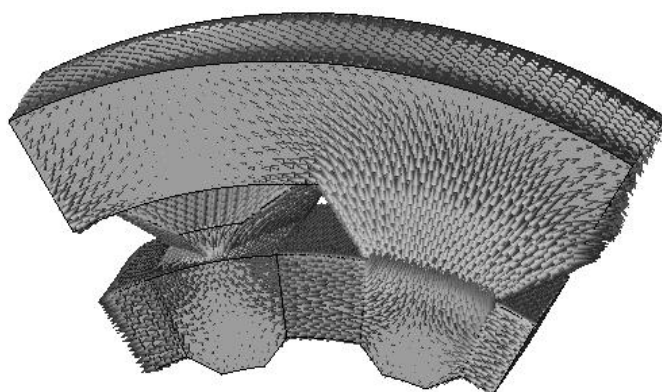
## ۴-۷- تأیید صحت الگوریتم به کمک شبیه سازی به روش اجزاء

### محدود

با مدل سازی الکترومغناطیسی دینامیکی ماشین طراحی شده در یک سیکل الکتریکی صحت طراحی مورد بررسی قرار می گیرد. چنانچه قبلا هم ذکر شد در این شبیه سازی از نرم افزار اجزاء محدود JMAG Designer 10.5 استفاده شده است که در صورت نیاز به اطلاعات کامل و دقیق از قابلیت های این نرم افزار و نحوه کار با آن می توان به راهنمای این نرم افزار و مثال های آموزشی همراه با آن مراجعه نمود. شکل (۱۲-۴)، توزیع چگالی شار مغناطیسی را در حالتی که متمرکز کننده های شار در مقابل پایه های استاتور قرار دارد نشان می دهد. این توزیع چگالی شار در حالت مدار باز که چگالی شار تنها ناشی از حضور آهنرباهای دائم می باشد، بدست آمده است. همانطور که از شکل مشاهده می شود اشباع در هیچ نقطه ای از ماشین اتفاق نمی افتد. این امر سبب کاهش نیروهای شعاعی وارد بر دندانه های استاتور می شود که به تفصیل در فصل بعد بررسی می گردد. همچنین در شکل (۱۳-۴) خطوط شار مغناطیسی نشان داده شده اند. این خطوط در واقع نشان دهنده مسیر شار مغناطیسی در داخل ماشین است.

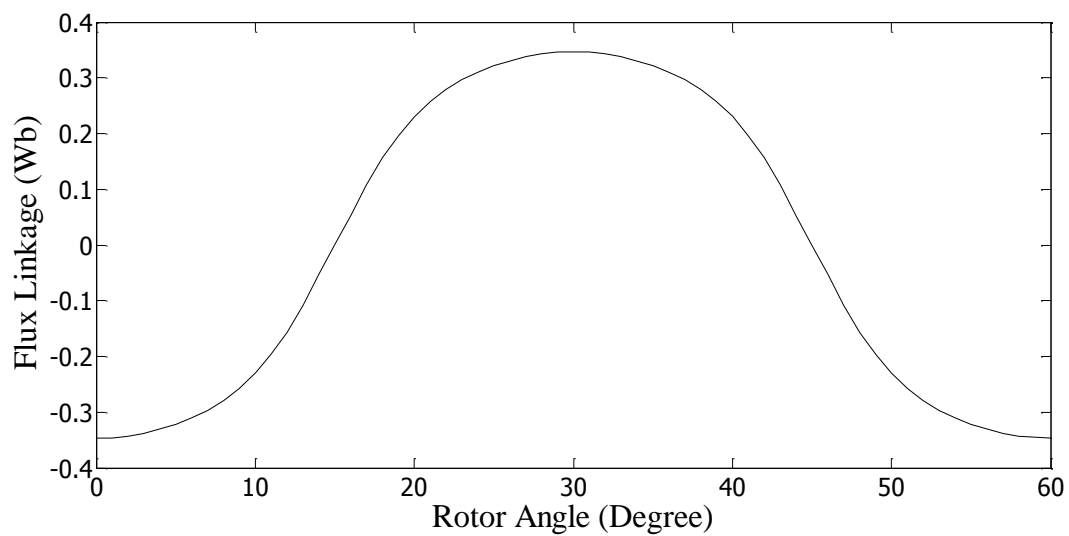


شکل (۴-۱۲): نقشه رنگی توزیع چگالی شار در موتور در حالت مدار باز

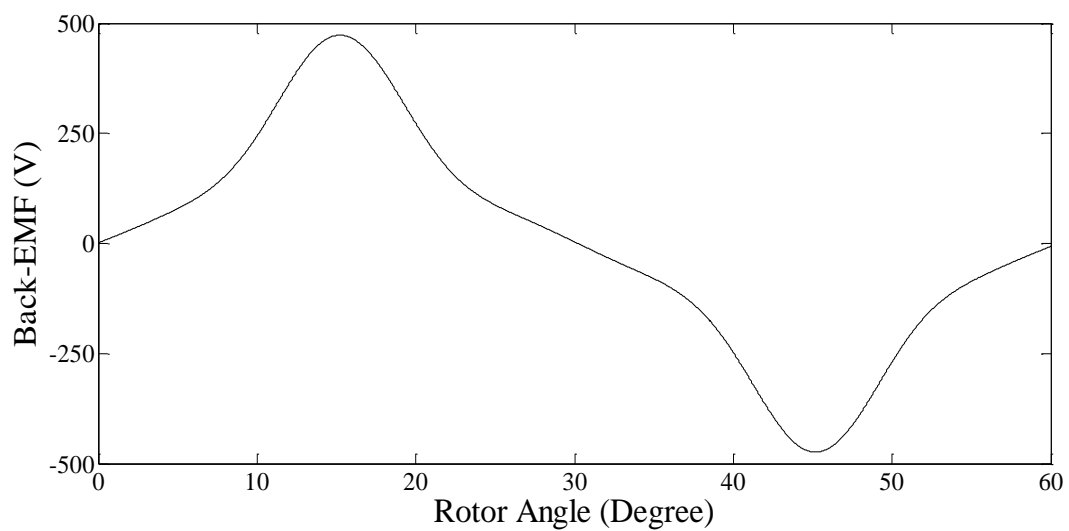


شکل (۴-۱۳): توزیع برداری چگالی شار در موتور در حالت مدار باز

تغییرات شار پیوندی سیم‌پیچ و Back-EMF در یک سیکل الکتریکی به ترتیب در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود Back-EMF ماشین طراحی شده تقریباً سینوسی می‌باشد که این امر صحت الگوریتم طراحی برای دستیابی به Back-EMF سینوسی را تایید می‌کند.



شکل (۴-۱۴): تغییرات شار پیوندی سیم‌پیچ در یک سیکل الکتریکی



شکل (۴-۱۵): Back-EMF به دست‌آمده از مشتق‌گیری از شار پیوندی

فصل پنجم : بررسی ارتعاشات و نویز صوتی موتور

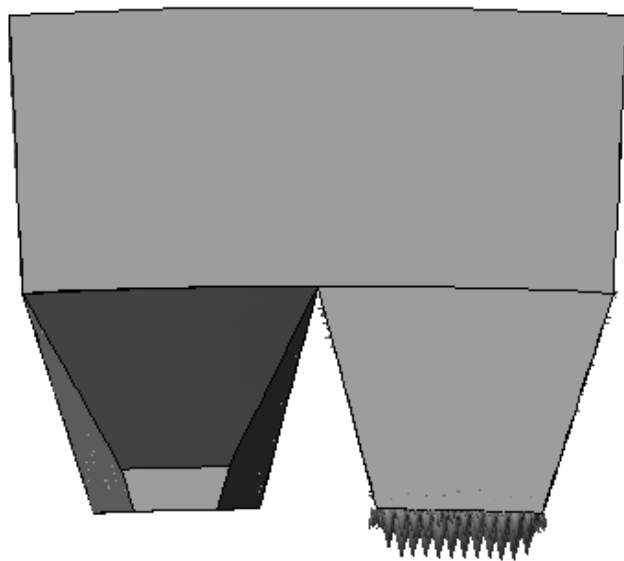
TFPM قطب چنگالی طراحی شده

## ۵-۱- مقدمه

در فصل قبل ساختار پیشنهادی در مراجع مورد بررسی قرار گرفت. اشکالات ساختاری و الگوریتم طراحی مطرح شد و پیشنهادهایی برای اصلاح آن‌ها ارائه گردید. سپس موتوری با ساختار اصلاح شده طراحی شد. طراحی با فرض دستیابی به توزیع چگالی شار تقریباً یکنواخت و Back-EMF سینوسی انجام شد و عملکرد درست موتور طراحی شده با شبیه سازی به روش اجزاء محدود مورد تأیید قرار گرفت. در این فصل ارتعاشات و نویز صوتی موتور طراحی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. چنانچه در فصل‌های قبل ذکر شد ریپل گشتاور و نیروهای شعاعی الکترومغناطیسی منابع اصلی ارتعاشات و نویز الکترومغناطیسی ماشین‌های الکتریکی به شمار می‌روند. با در نظر گرفتن اهمیت این دو پارامتر در ارتعاشات و نویز صوتی موتور، هدف اصلی این پایان‌نامه، کاهش این دو پارامتر مهم در موتور طراحی شده است. برای نیل به این هدف، برخی اصلاحات ساختاری پیشنهاد می‌شود که عملکرد ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی را بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد. به منظور بررسی ارتعاشات و نویز موتور طراحی شده سه نوع تحلیل الکترومغناطیسی، ساختاری و فرکانسی انجام می‌شود که هر یک به ترتیب فرآیند بررسی ارتعاشات و نویز موتور توضیح داده خواهند شد.

## ۵-۲- تحلیل الکترومغناطیسی

در تحلیل الکترومغناطیسی تنها عوامل ایجاد نویز محاسبه و بررسی می‌شوند و روش‌هایی برای کاهش آن‌ها ارائه می‌گردد. اولین عامل ایجاد ارتعاشات و نویز که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار می‌گیرد، نیروهای الکترومغناطیسی است که به دندانه‌های استاتور وارد می‌شوند. به کمک نرم افزار اجزاء محدود JMAG Designer این نیروها که به یکی از دندانه‌های استاتور وارد شده‌اند در شکل (۵-۱) نشان داده شده است:



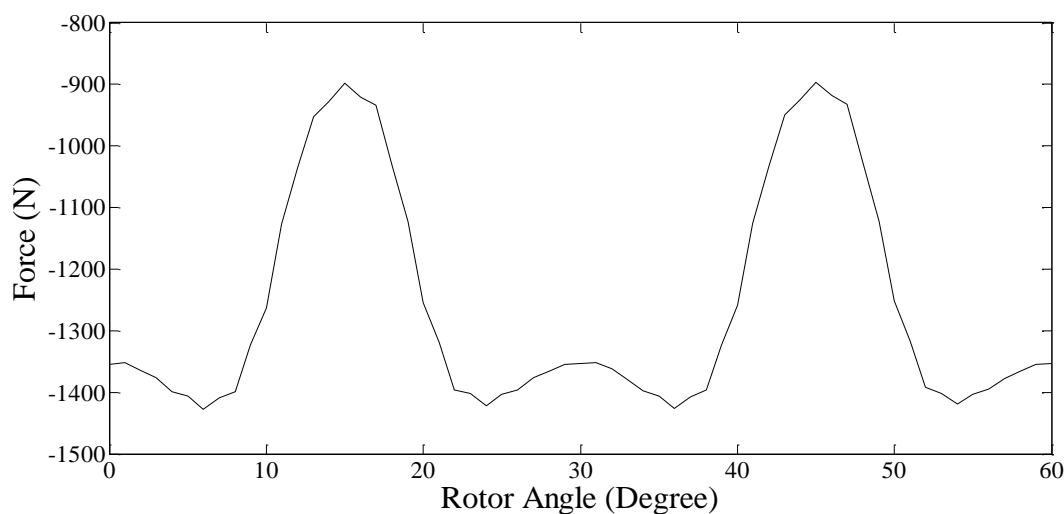
شکل (۵-۱): نیروهای شعاعی وارد بر دندانه استاتور موتور TFPM قطب چنگالی

برای بدست آوردن این نیروها می‌توان موتور را به صورت بدون بار و یا تحت بار بررسی کرد که این مسئله بستگی به هدف انجام تحلیل الکترومغناطیسی دارد. به عنوان مثال ممکن است هدف بررسی اثر هارمونیک‌های فضائی چگالی شار در ایجاد ارتعاشات و نویز موتور و یا بررسی تاثیر منبع تغذیه در ایجاد نویز باشد.

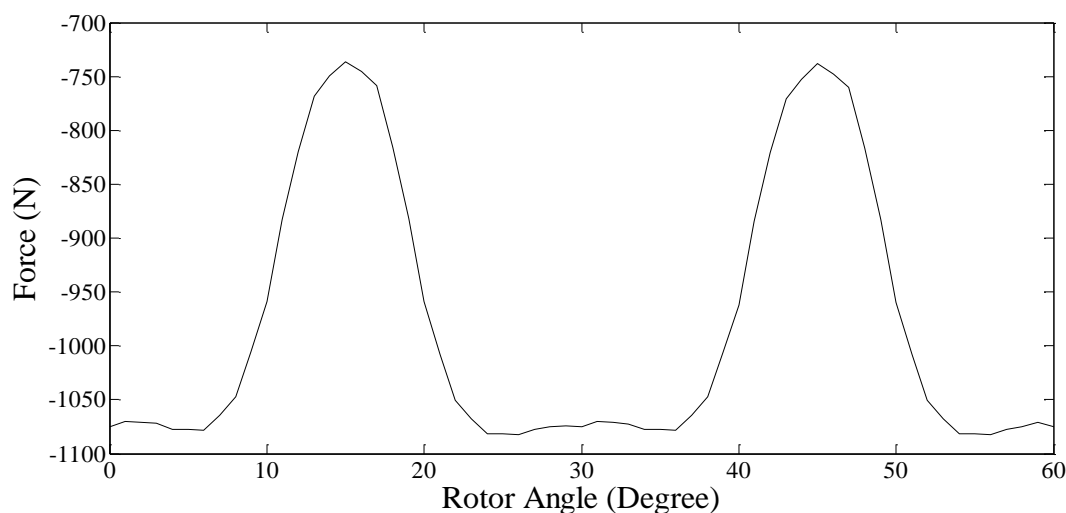
در فصل قبل نشان داده شد که یکی از مشکلات اساسی موتور TFPM قطب چنگالی به اشباع رفتن متمرکزکننده‌های شار است. ساختاری جدید برای متمرکزکننده‌های شار ارائه شد و با شبیه‌سازی موتور به روش اجزاء محدود عملکرد مطلوب این ساختار از نقطه نظر توزیع چگالی شار مورد تایید قرار گرفت. در این فصل تاثیر ساختار جدید متمرکزکننده شار از نقطه نظر ارتعاشات و نویز مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجائی که در این بخش به تحلیل الکترومغناطیسی پرداخته می‌شود تنها تاثیر ساختار جدید بر روی نیروهای شعاعی بررسی می‌شود و تاثیر آن بر روی ارتعاشات در بخش‌های بعدی بررسی می‌گردد.

در شکل‌های (۵-۲) و (۵-۳) به ترتیب نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور موتور طراحی شده در حالتی که متمرکزکننده‌های شار دچار اشباع شده‌اند و در حالتی که از ساختار متمرکزکننده شار

اصلاح شده استفاده شود، نشان داده شده است.



شکل (۲-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندانه استاتور در حالت اشباع



شکل (۳-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندانه استاتور موتور با متمرکزکننده شار اصلاح شده

چنانچه در فصل قبل به آن اشاره شد پدیده اشباع باعث کاهش راندمان، افزایش تلفات هسته و ... می‌گردد. این پدیده می‌تواند سبب اضافه شدن مولفه‌های هارمونیکی جدید به نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور و یا افزایش دامنه مولفه‌های هارمونیکی نیروهای شعاعی ناشی از سایر منابع شود که نهایتاً منجر به افزایش ارتعاشات و نویز صوتی ماشین می‌گردد. [۲۴]

برای بررسی دقیق‌تر، نتایج آنالیز هارمونیکی نیروهای شعاعی وارد بر دندانه استاتور در حالتی که

ماشین دچار اشباع شده است و در حالتی که از متمرکزکننده شار اصلاح شده استفاده شود در جدول زیر داده شده است:

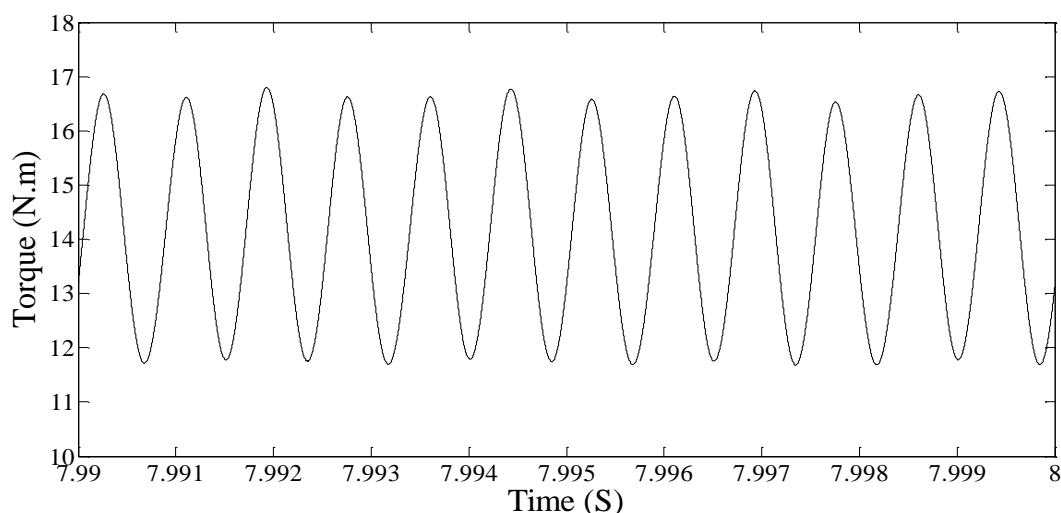
جدول (۵-۱): نتایج آنالیز هارمونیک نیروهای شعاعی

| نیروهای شعاعی ماشین با<br>متمرکزکننده اصلاح شده (N) | نیروهای شعاعی در حالت<br>اشباع (N) | شماره هارمونیک‌ها |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| ۹۷۷/۴۱۷                                             | ۱۲۵۶/۴۹۴                           | ۰                 |
| ۰/۷۰۲                                               | ۱/۲۰۵                              | ۱                 |
| ۱۵۸/۶۴۰                                             | ۲۱۳/۹۱۳                            | ۲                 |
| ۰/۳۷۸                                               | ۰/۰۷۳                              | ۳                 |
| ۷۹/۸۲۱                                              | ۱۴۱/۵۴۴                            | ۴                 |
| ۰/۲۷۴                                               | ۰/۲۹۶                              | ۵                 |
| ۱۳/۷۳۸                                              | ۱۹/۴۳۰                             | ۶                 |
| ۰/۱۳۸                                               | ۰/۰۳۶                              | ۷                 |
| ۵/۱۹۴                                               | ۹/۳۰۱                              | ۸                 |
| ۰/۰۵۴                                               | ۰/۱۴۲                              | ۹                 |
| ۵/۱۱۳                                               | ۸/۹۶۳                              | ۱۰                |
| ۰/۱۷۷                                               | ۰/۱۶۲                              | ۱۱                |
| ۴/۰۲۳                                               | ۵/۱۰۹                              | ۱۲                |
| ۰/۱۷۴                                               | ۰/۱۰۷                              | ۱۳                |
| ۱/۲۵۳                                               | ۲/۰۶۱                              | ۱۴                |
| ۰/۱۴۶                                               | ۰/۲۳۰                              | ۱۵                |
| ۰/۵۸۱                                               | ۰/۶۱۵                              | ۱۶                |
| ۰/۲۰۷                                               | ۰/۰۴۸                              | ۱۷                |



به عنوان نمونه چنانچه مشاهده می‌شود دامنه مولفه dc، هارمونیک چهارم، هارمونیک ششم و هارمونیک دهم نیروی شعاعی نسبت به حالت قبلی که ماشین دچار اشباع شد به ترتیب ۲۲، ۴۳، ۲۹ و ۴۲ درصد کاهش پیدا کرده است. این امر می‌تواند سبب کاهش ارتعاشات و نویز موتور شود.

اگرچه می‌توان گفت که با استفاده از متمرکزکننده با ساختار اصلاح شده ارتعاشات و نویز موتور کاهش چشمگیری پیدا می‌کند اما شبیه‌سازی‌های متعدد نشان می‌دهد که این ساختار دارای ریبیل گشتاور بالائی می‌باشد که این مسئله سبب افزایش نویز تولیدی موتور می‌شود. با شبیه سازی مدار معادل موتور (در بخش‌های بعد جزئیات این مدار معادل ذکر خواهد شد) در محیط متلب گشتاور موتور تحت شرایط نامی در شکل (۴-۵) نشان داده شده است:



شکل (۴-۵): گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای موتور

با توجه به شکل فوق و با استفاده از رابطه (۳-۱۳) ریبیل گشتاور موتور برابر است با:

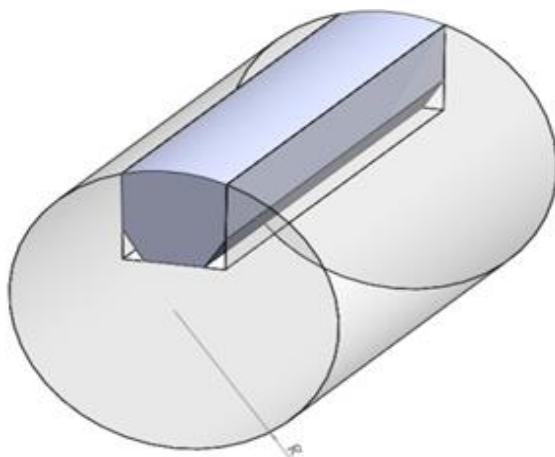
$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{average}} = \frac{16.8 - 11.8}{14.3} = 0.35$$

همانطور که مشاهده می‌شود ریبیل گشتاور در این حالت ۳۵ درصد است. این ریبیل گشتاور بالا باعث لرزش‌های ناخواسته موتور و ایجاد نویز صوتی می‌گردد. بنابراین باید روشی جهت کاهش ریبیل گشتاور

ارائه گردد.

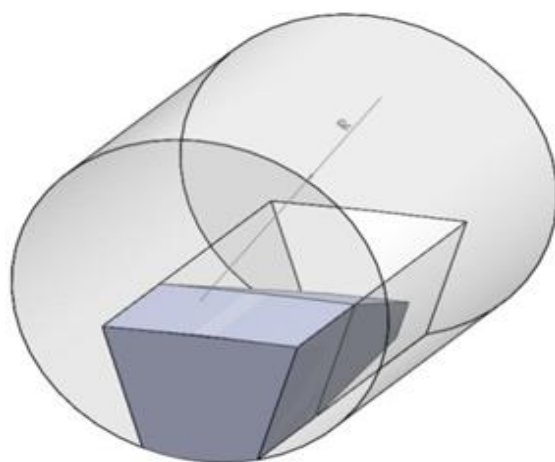
## ۵-۲-۱- ساختار پیشنهادی جهت کاهش ریپل گشتاور

کاهش ریپل گشتاور می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش ارتعاشات و نویز صوتی ماشین شود. کنترل شکل موج جریان با توجه به شکل موج ولتاژ القائی، می‌تواند سهم قابل توجهی در کاهش ریپل گشتاور ماشین‌های الکتریکی و نویزهای صوتی حاصل از آن داشته باشد [۲۵] اما این کار در بعضی موارد با محدودیت‌هایی مواجه است و یا اجرای آن پیچیده و هزینه‌بر می‌باشد. به هر حال ایجاد اصلاحات ساختاری برای دستیابی به ولتاژ القائی تا حد امکان سینوسی جهت کاهش ریپل گشتاور، همواره مطلوب و مورد توجه طراحان می‌باشد. برای این منظور می‌توان اصلاحاتی در فاصله هوایی ساختار موتور انجام داد. به عبارت دیگر مشابه موتورهای سنکرون معمولی قطب برجسته از ساختاری با فاصله هوایی غیر یکنواخت استفاده کرد. این فاصله هوایی باید به گونه‌ای تغییر کند که در هنگام قرارگیری پایه استاتور در مقابل متمرکزکننده شار، در مرکز متمرکزکننده شار کمترین مقدار و در طرفین متمرکزکننده شار بیشترین مقدار فاصله هوایی ایجاد گردد. جهت دستیابی به این ساختار باید انحنای سطح متمرکزکننده شار و سطح مجاور به فاصله هوایی دندان‌های استاتور اصلاح شود. برای اصلاح انحنای سطح متمرکزکننده شار می‌توان از یک استوانه کمک گرفت. برای این منظور استوانه‌ای با شعاع دلخواه و ارتفاعی برابر با طول محوری ماشین انتخاب می‌شود. سپس متمرکزکننده شار در داخل این استوانه به گونه‌ای قرار داده می‌شود که سطح جانبی استوانه بر سطح بالائی متمرکزکننده شار مماس شود. با تغییر شعاع استوانه می‌توان برش لازم را در سطح متمرکزکننده شار به گونه‌ای ایجاد کرد که در نقطه میانی سطح متمرکزکننده شار تغییری ایجاد نشود و سطح جانبی استوانه بر سطح جدید متمرکزکننده شار ایجاد شده پس از برش، مماس باشد. شکل (۵-۵) چگونگی انجام این کار برای دستیابی به انحنای مطلوب را نشان می‌دهد.



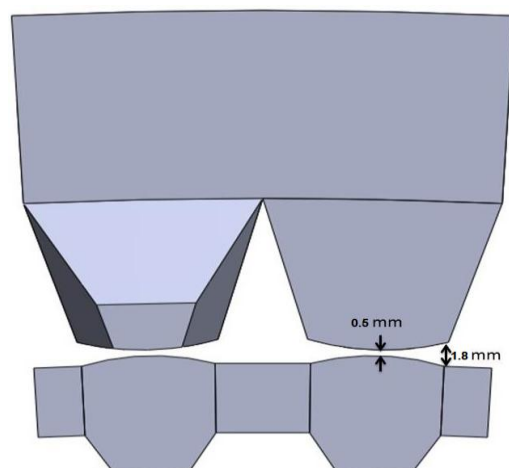
شکل (۵-۵): طریقه اصلاح سطح متمرکزکننده شار

برای اصلاح سطح زیرین دندانه استاتور از روشی مشابه استفاده می‌شود با این تفاوت که در این حالت باید سطح زیرین دندانه استاتور با سطح جانبی استوانه مماس گردد. شعاع استوانه با توجه به مقدار ماکزیمم فاصله هوایی مورد نیاز تعیین می‌گردد. شکل (۶-۵) چگونگی انجام این کار را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۵): طریقه اصلاح سطح زیرین دندانه استاتور

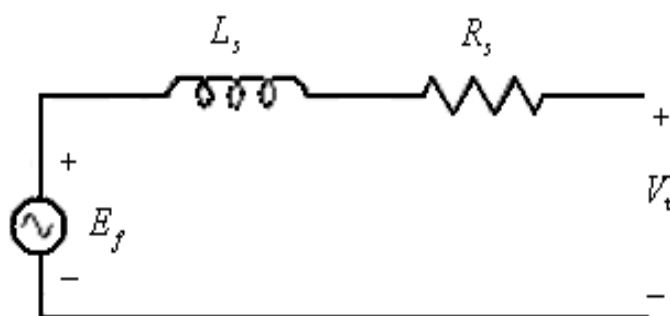
بدست آوردن رابطه‌ای برای تعیین مقدار مینیمم و ماکزیمم فاصله هوایی کار آسانی نیست. مقدار بهینه توسط شبیه‌سازی‌های بسیار به کمک روش اجزاء محدود و نرم افزار متلب تعیین می‌شود. ساختار یک جفت قطب موتور با فاصله هوایی غیر یکنواخت در شکل (۷-۵) نشان داده شده است. در این شکل مقدار مینیمم و ماکزیمم فاصله هوایی به ترتیب 0.5 mm و 1.8 mm می‌باشد.



شکل (۷-۵): ساختار موتور با فاصله هوایی غیر یکنواخت

با تغییر انحنای سطح متمرکز کننده شار و دندانه‌های استاتور در واقع طول موثر فاصله هوایی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش طول موثر فاصله هوایی ممکن است پارامترهای عملکردی موتور مانند ولتاژ القائی، راکتانس سنکرون، گشتاور ماکزیمم و ... تغییر کند. بنابراین با هر تغییری در فاصله هوایی، باید مدل مداری از موتور در نرم افزار متلب شبیه سازی شده و عملکرد موتور برای تامین نیازمندی‌های بار مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور نیاز است که درباره نحوه شبیه‌سازی موتور در محیط متلب توضیحاتی داده شود.

از آنجا که در ماشین TFPM مورد بررسی تزویجی بین فازها وجود ندارد، برای بررسی رفتار موتور در تامین نیازمندی‌های بار، می‌توان مدار معادل شکل (۸-۵) را به عنوان مدل الکتریکی هر فاز ماشین در نظر گرفت.



شکل (۸-۵): مدار معادل یک فاز ماشین

که در این مدار معادل،  $R_s$  مقاومت سیم‌پیچی،  $L_s$  اندوکتانس خودی،  $E_f$  ولتاژ داخلی و  $V_t$  ولتاژ ترمینال هر فاز ماشین می‌باشند. باید توجه داشت که در حالت کلی، اندوکتانس‌های خودی  $L_s$  و ولتاژهای داخلی  $E_f$  فازهای مختلف ماشین طراحی شده تابع موقعیت روتور بوده و نسبت به هم  $60^\circ$  درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند. پیش از مدل کردن موتور در محیط متلب می‌توان با بررسی مقادیر پریونیت پارامترهای اساسی آن، رفتار موتور را در تامین نیازمندی‌های بار مورد ارزیابی اولیه قرار داد. در بخش بعد مقادیر پریونیت برخی از پارامترهای موتور طراحی شده محاسبه می‌گردد.

### ۵-۲-۱-۱- مقادیر پریونیت پارامترهای موتور طراحی شده

معمولاً پارامترهای مهم ماشین از جمله مقاومت سیم‌پیچ‌ها، راکتانس سنکرون و ولتاژ القاء شده در هر فاز را به صورت پریونیت بیان می‌کنند. برای ماشین طراحی شده مقادیر پریونیت این پارامترها به صورت زیر می‌باشد:

$$V_b = 270 \text{ V}$$

$$S_b = \frac{P_{out}}{m\eta\cos\phi} = \frac{3000}{6(0.9)(0.93)} = 0.59737 \text{ KVA/ph}$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = 122.04 \text{ } \Omega$$

$$R_s = \frac{2.3146}{122.04} = 0.019 \text{ pu}$$

$$X_s = \frac{30.159}{122.04} = 0.247 \text{ pu}$$

$$E_f = \frac{251.7}{270} = 0.93 \text{ pu}$$

با توجه به مقادیر پریونیت بدست آمده می‌توان گفت که موتور طراحی شده توانایی تامین بار را دارد

اما برای بررسی دقیقتر باید مدل مداری ماشین در محیط متلب شبیه‌سازی شود. در بخش بعد نحوه شبیه‌سازی بار در محیط متلب توضیح داده خواهد شد.

### ۵-۲-۱-۲-۵ - رابطه سرعت-گشتاور

برای مدل کردن بار می‌توان از رابطه سرعت-گشتاور مطابق رابطه (۱-۵) استفاده کرد:

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (۱-۵)$$

که در این رابطه  $T_e$  گشتاور الکترومغناطیسی،  $T_m$  گشتاور مقاوم و  $J$  ممان اینرسی روتور می‌باشد. همچنین  $B$  نشان دهنده ضریب میراکننده است که با ضرب آن در سرعت مکانیکی روتور، گشتاور اصطکاکی بدست می‌آید. در بخش بعد نحوه محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی شرح داده خواهد شد.

### ۵-۳-۱-۲-۵ - محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی

توان خروجی یک ماشین ۶ فاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{out} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f \quad (۲-۵)$$

که در این رابطه  $e_x$  و  $i_x$  به ترتیب مقادیر لحظه‌ای ولتاژ القایی و جریان هر فاز موتور می‌باشد. همچنین برای محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی داریم:

$$T_e = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (۳-۵)$$

با جایگذاری رابطه (۲-۵) در (۳-۵) داریم:

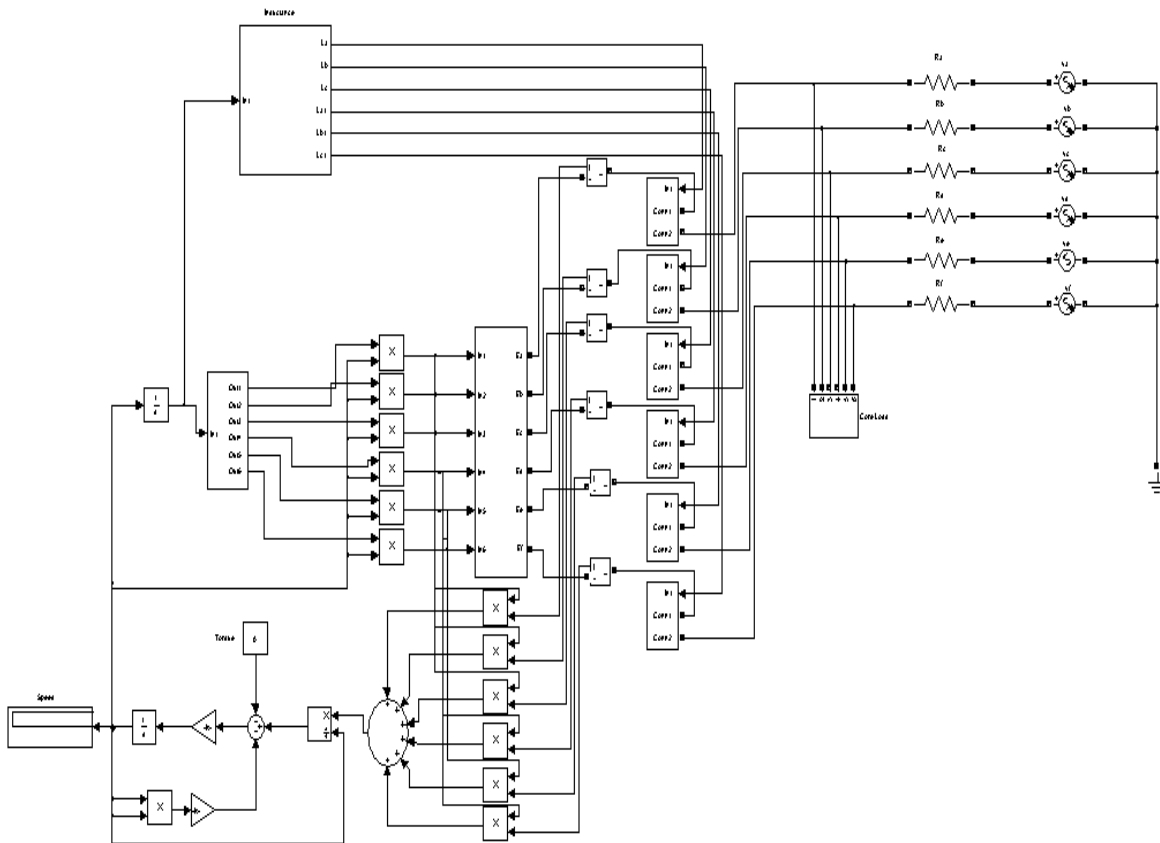
$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f}{\omega_m} \quad (۴-۵)$$

بنابراین برای محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی کافی است مقادیر لحظه‌ای ولتاژها و جریان‌های هر

فاز را در هم ضرب کرده و مقادیر به دست آمده را با هم جمع و بر سرعت مکانیکی چرخش روتور تقسیم کرد.

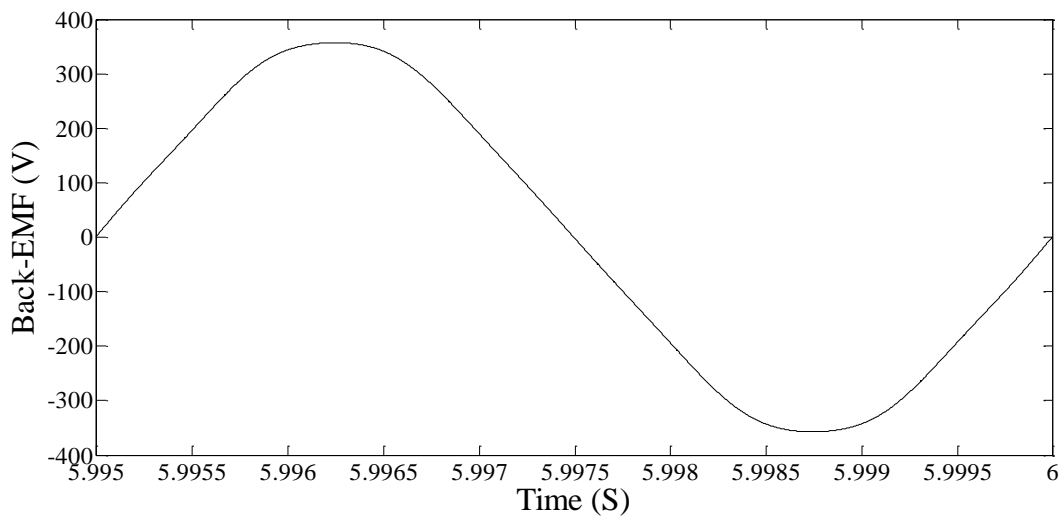
#### ۵-۲-۱-۴- شبیه‌سازی دینامیکی گذرائی موتور

برای بررسی رفتار دینامیکی گذرائی موتور طراحی شده باید با در نظر گرفتن روابط فوق و با استفاده از مقادیر محاسبه شده مدار معادل شکل (۵-۸) را در نرم افزار متلب شبیه‌سازی و رفتار ماشین را بررسی کرد. شکل (۵-۹) شماتیک شبیه‌سازی مدار موتور طراحی شده با تغذیه سینوسی را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی موتور توسط ۶ منبع ولتاژ سینوسی با مقدار موثر ۲۷۰ ولت و فرکانس ۲۰۰ هرتز که نسبت به هم ۶۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند تغذیه می‌گردد. لازم به ذکر است که در ماشین TFPM مقدار اندوکتانس خودی سیم‌پیچی هر فاز معمولاً حول یک مقدار متوسط دارای تغییراتی است که در بعضی موارد (مشابه بخش محاسبه مقادیر پریونیت) شاید بتوان از این تغییرات چشم پوشی کرد و راکتانس سنکرون ثابت و مشخصی برای تحلیل حالت دائمی ماشین در نظر گرفت. اما در خیلی از موارد این تغییرات به قدری زیاد است که برای بررسی رفتار حالت دائمی ماشین چشم‌پوشی از این تغییرات ممکن است به خطای بزرگی منجر شود. در چنین شرایطی باید تغییرات آن را در شبیه‌سازی‌ها لحاظ نمود. به هر حال در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این پایان-نامه تغییرات بطور کامل منظور شده‌اند.



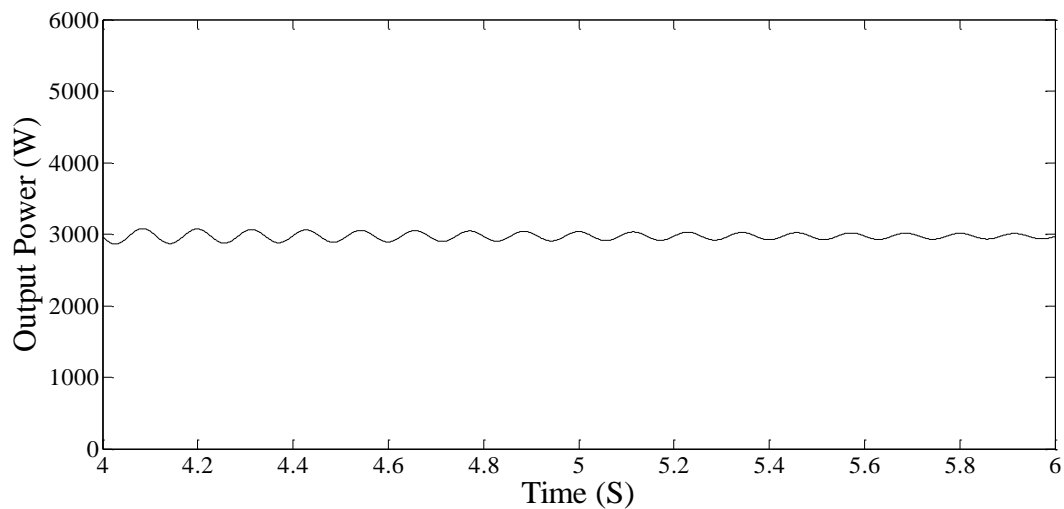
شکل (۵-۹): شماتیک شبیه‌سازی موتور طراحی شده در محیط متلب

با راه‌اندازی موتور تحت شرایط نامی نتایج به صورت زیر خواهد بود.

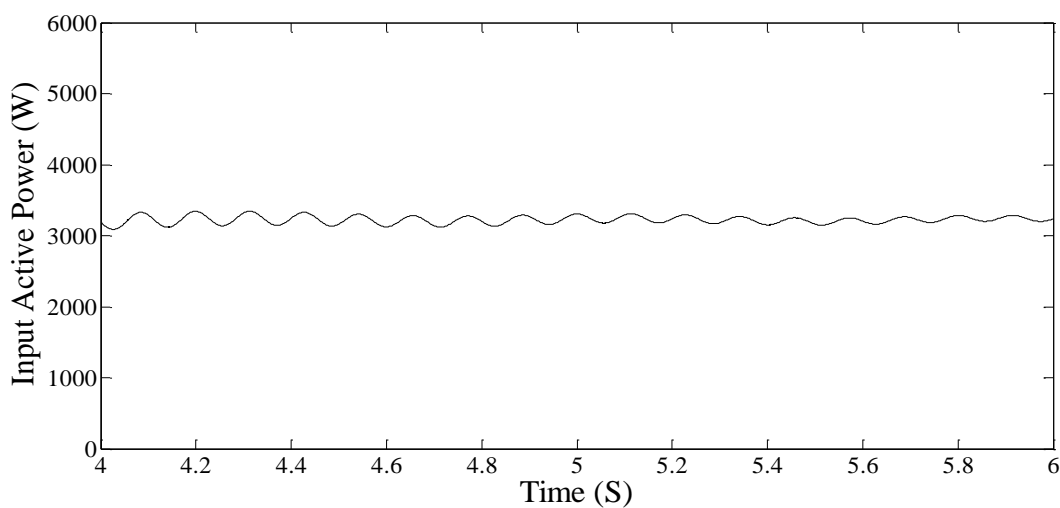


شکل (۵-۱۰): ولتاژ القایی

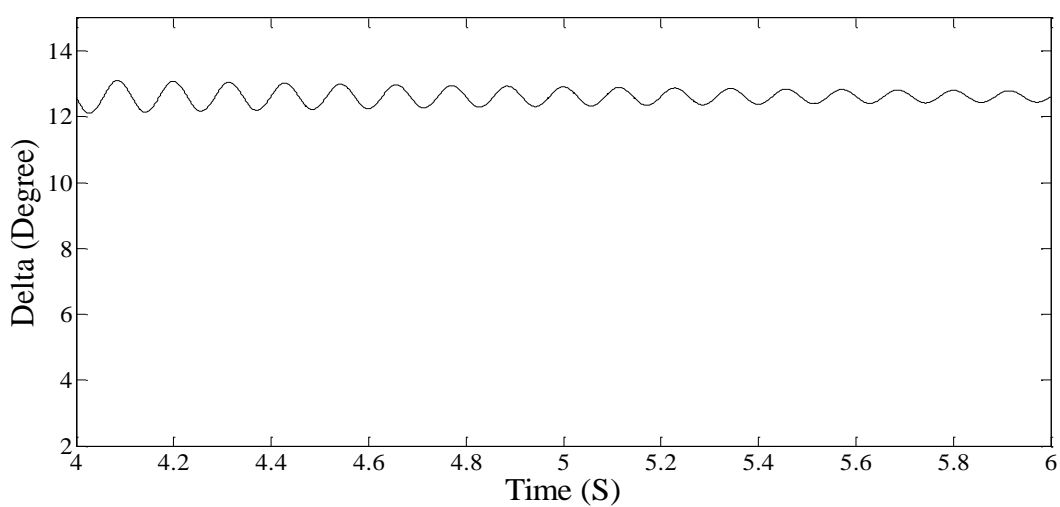




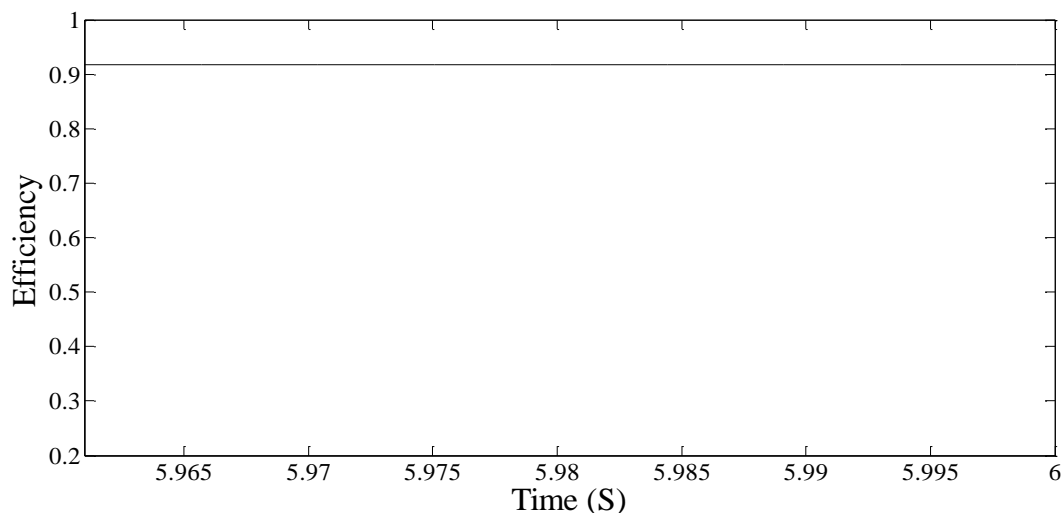
شکل (۵-۱۱): توان خروجی موتور



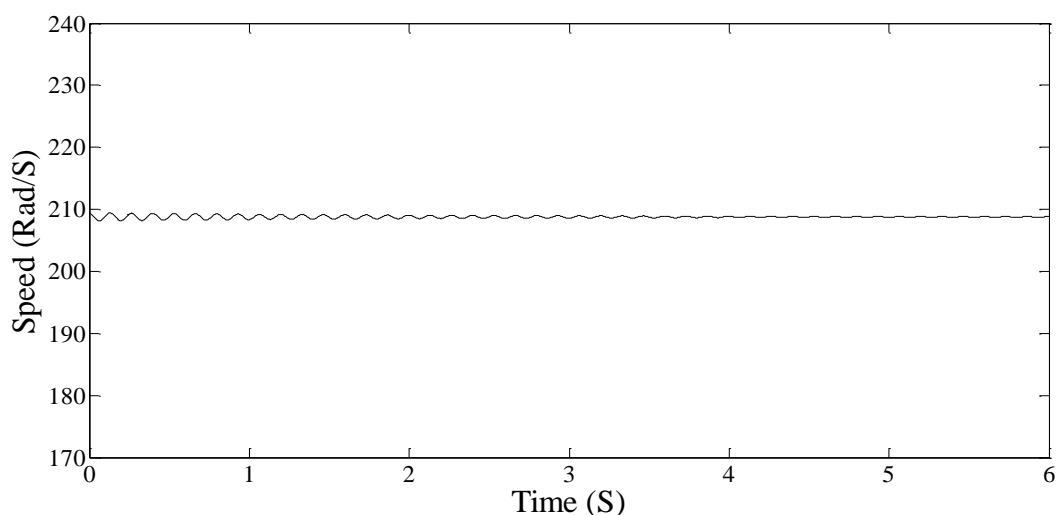
شکل (۵-۱۲): توان اکتیو ورودی موتور



شکل (۵-۱۳): زاویه قدرت  $\delta$  موتور



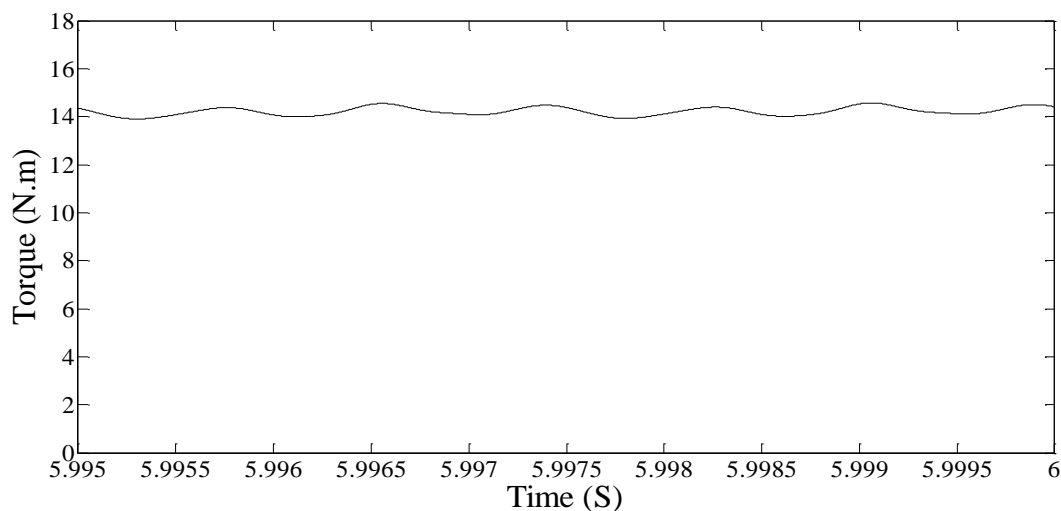
شکل (۵-۱۴): بازده موتور



شکل (۵-۱۵): سرعت مکانیکی موتور

در شکل (۵-۱۰) ولتاژ القایی موتور نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود ولتاژ القایی در این حالت نسبت به حالتی که موتور دارای فاصله هوایی یکنواخت بود سینوسی تر شده است به عبارت دیگر هارمونیک‌های آن کمتر شده است که این امر می تواند سبب کاهش ریپل گشتاور موتور شود. اگرچه در این حالت دامنه ولتاژ القایی کاهش پیدا کرده است اما مقدار اندوکتانس موتور هم کاهش پیدا کرده است که این امر سبب می شود موتور بتواند بار مورد نیاز را تامین کند. برای تایید این مطلب توان خروجی موتور در شکل (۵-۱۱) داده شده است. همچنین توان اکتیو ورودی، زاویه

قدرت، بازده و سرعت مکانیکی موتور نیز برای صحت شبیه‌سازی به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۲)، (۵-۱۳)، (۵-۱۴) و (۵-۱۵) داده شده است. در شکل (۵-۱۶) گشتاور لحظه‌ای خروجی موتور نشان داده شده است.

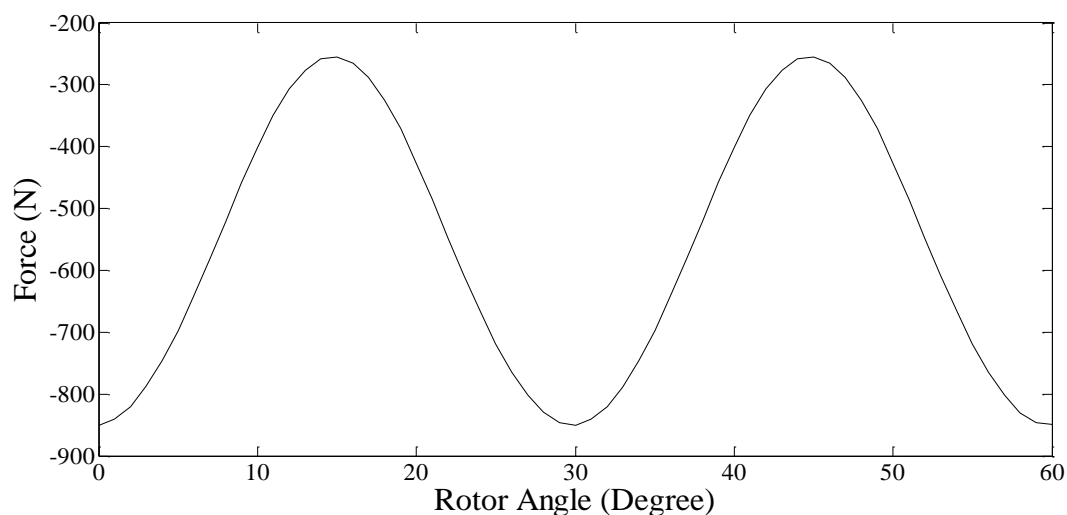


شکل (۵-۱۶): گشتاور الکترومغناطیسی خروجی موتور

با توجه به شکل فوق رپل گشتاور موتور برابر است با:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{average}} = \frac{14.7 - 13.8}{14.3} = 0.06$$

در مقایسه با طراحی قبلی دامنه نوسانات گشتاور ۲۹ درصد کاهش داشته است که این کاهش قابل توجه سبب کاهش تنش‌های وارد بر موتور و به عبارت دیگر کاهش نویز تولیدی ناشی از نوسانات گشتاور موتور می‌شود. همچنین نمودار نیروی شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور در حالت بی‌باری در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نیروی شعاعی نسبت به حالت قبل سینوسی‌تر شده است.



شکل (۵-۱۷): نیروی شعاعی وارد بر دندانه استاتور موتور طراحی شده با فاصله هوایی غیر یکنواخت

برای بررسی بهتر آنالیز هارمونیک نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور در جدول زیر داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود دامنه بسیاری از هارمونیک‌ها کاهش یافته است. البته از آنجایی که تغییراتی در ساختار استاتور ایجاد شده است ممکن است فرکانس‌های طبیعی موتور با فاصله هوایی غیر یکنواخت منطبق بر فرکانس‌های نیروهای شعاعی شود و تشدید رخ دهد. این مسئله در بخش تحلیل ساختاری به تفصیل بررسی خواهد شد.

جدول (۵-۲): نتایج آنالیز هارمونیک نیروهای شعاعی وارد بر دندانه استاتور موتور طراحی شده با فاصله هوایی غیر یکنواخت

| شماره هارمونیک‌ها | دامنه (N) | زاویه (Degree) |
|-------------------|-----------|----------------|
| ۰                 | ۵۵۷/۸۷۵   | ۱۸۰            |
| ۱                 | ۰/۰۷۳     | -۶۷/۴۳۸        |
| ۲                 | ۲۹۶/۹۶۸   | -۱۷۷/۳۰۷       |
| ۳                 | ۰/۰۳۲     | ۱۱۰/۳۱۷        |
| ۴                 | ۶/۲۸۲     | ۱۰/۳۰۰         |
| ۵                 | ۰/۰۲۸     | -۱۵۵/۷۲۳       |
| ۶                 | ۱/۱۴۶     | ۱۷۸/۸۷۰        |
| ۷                 | ۰/۰۲۳     | -۱۷۳/۶۷۱       |
| ۸                 | ۰/۵۸۲     | -۱۷۰/۲۰۷       |
| ۹                 | ۰/۰۰۸     | ۱۱۶/۵۶۹        |
| ۱۰                | ۰/۰۹۲     | -۵/۹۸۰         |
| ۱۱                | ۰/۰۱۰     | ۷۴/۷۲۰         |
| ۱۲                | ۰/۰۵۱     | -۸۳/۳۵۴        |
| ۱۳                | ۰/۰۱۸     | ۱۳۸/۷۷۱        |
| ۱۴                | ۰/۰۲۲     | -۶۵/۳۴۴        |
| ۱۵                | ۰/۰۱۰     | ۶۶/۳۴۷         |
| ۱۶                | ۰/۰۲۶     | -۷۳/۳۳۰        |
| ۱۷                | ۰/۰۲۸     | ۴۰/۳۴۸         |
| ۱۸                | ۰/۰۳۵     | -۱۰۳/۶۱۱       |
| ۱۹                | ۰/۰۲۹     | ۱۰۸/۷۸۲        |
| ۲۰                | ۰/۰۲۶     | -۱۲۲/۱۴۵       |
| ۲۱                | ۰/۰۲۳     | ۵۸/۹۴۱         |

## ۵-۲-۲- بررسی نیروهای شعاعی وارد بر موتور تحت بار

تا اینجا نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور در حالت بی‌باری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین روش‌هایی برای کاهش این نیروها که منجر به کاهش نویز صوتی موتور می‌گردد ارائه شد. در این بخش موتور تحت بار راه‌اندازی می‌شود و نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور مشخص می‌گردد. برای این منظور جریان کشیده شده توسط موتور در محیط متلب تعیین شده و با اعمال این جریان به موتور در محیط نرم افزار اجزاء محدود نیروهای شعاعی مشخص می‌گردد. به طور کلی برای بررسی رفتار موتور تحت بار دو حالت زیر در نظر گرفته می‌شود:

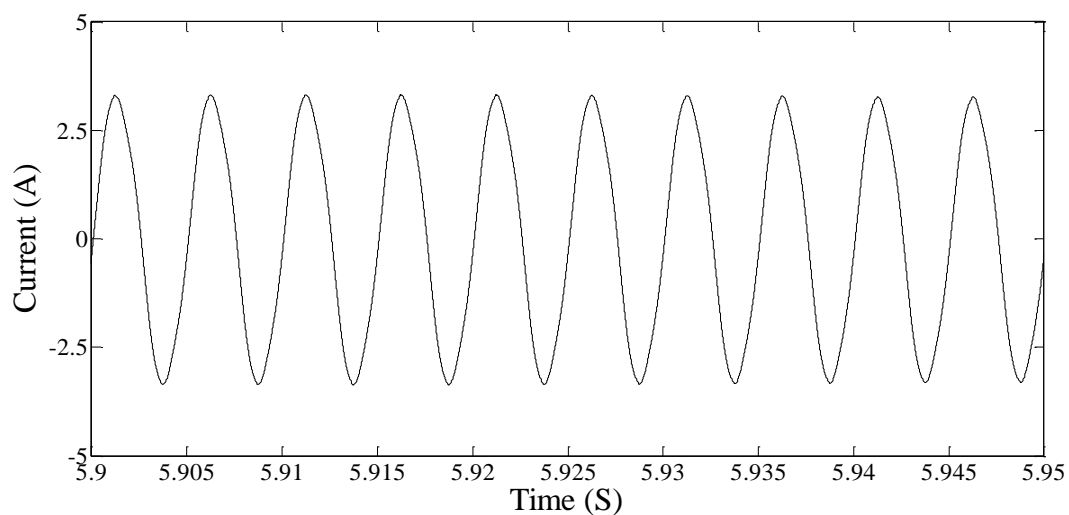
۱- راه اندازی موتور توسط منبع تغذیه سینوسی

۲- راه اندازی موتور توسط درایو

در ادامه هر یک از این دو حالت به تفصیل بررسی می‌شود و نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور تحت بار نامی تعیین می‌گردد.

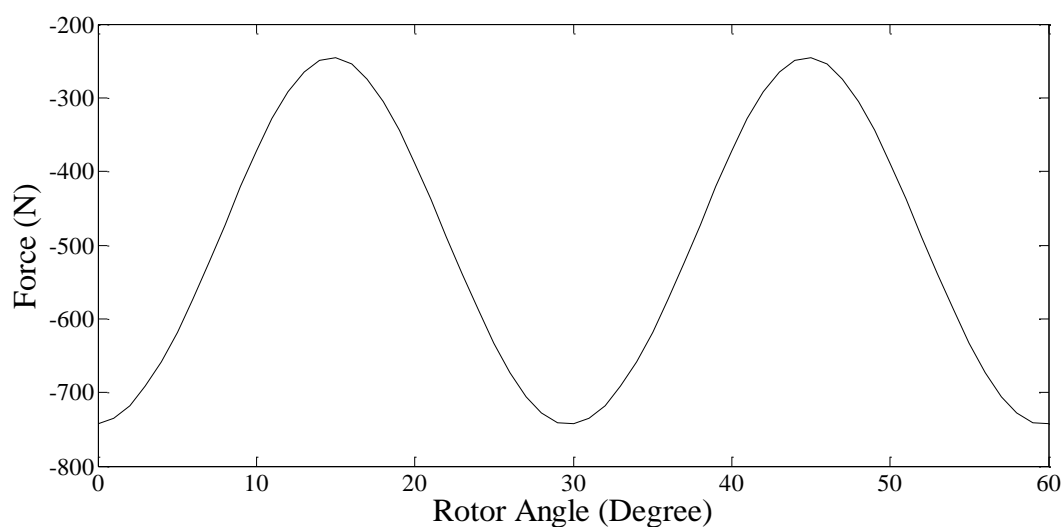
## ۵-۲-۲-۱- راه اندازی موتور توسط منبع تغذیه سینوسی

در شکل (۵-۱۸) جریان کشیده شده توسط فاز a موتور نشان داده شده است. این جریان از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به نقطه دائمی دارای نوساناتی می‌باشد. جریان سایر فازها از نظر ظاهر مشابه فاز a بوده با این تفاوت که هر یک نسبت به هم ۶۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند.



شکل (۵-۱۸): جریان جاری شده در فاز a استاتور

با اعمال جریان فوق به موتور در نرم افزار اجزاء محدود نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور بدست می‌آید. شکل (۵-۱۹) این نیروها را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۹): نیروی شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور

همچنین نتایج آنالیز هارمونیک نیروهای شعاعی در جدول (۵-۳) نشان داده شده است.

جدول (۳-۵): نتایج آنالیز هارمونیک نیروهای شعاعی وارد بر دندانه استاتور در حالت تغذیه سینوسی

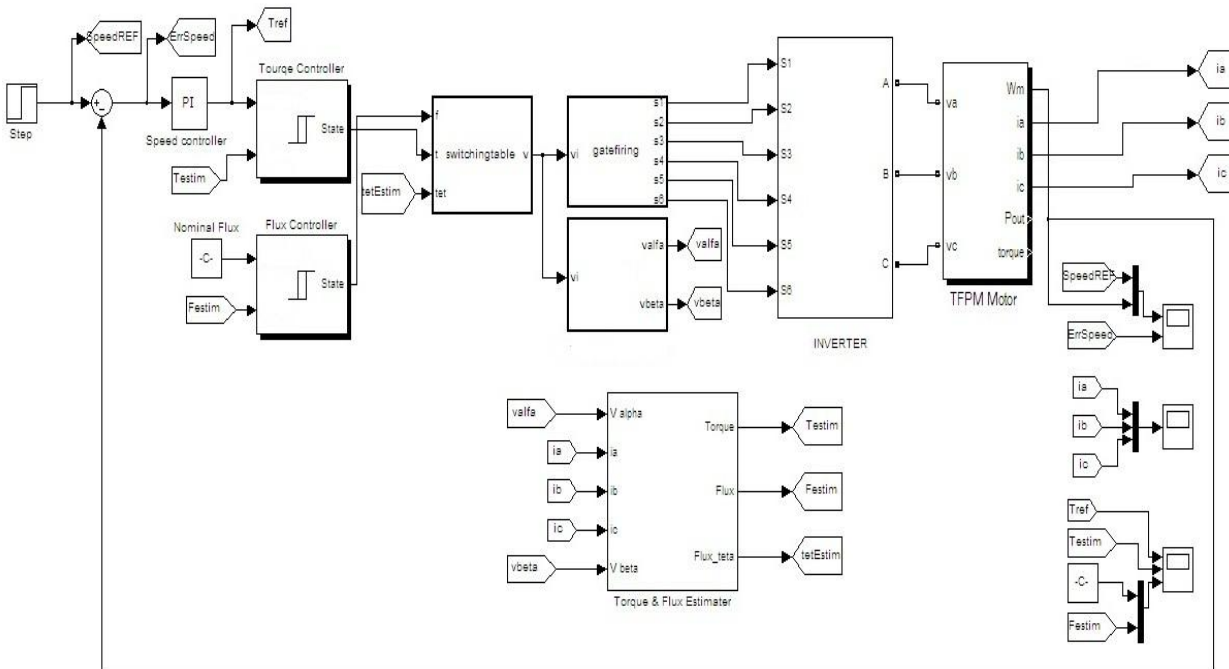
| شماره هارمونیک‌ها | دامنه (N) | زاویه (Degree) |
|-------------------|-----------|----------------|
| ۰                 | ۵۰۰/۸۴۹   | ۱۸۰            |
| ۱                 | ۰/۷۶۱     | -۷۱/۲۴۱        |
| ۲                 | ۲۴۷/۸۵۶   | ۱۷۰/۱۴۳        |
| ۳                 | ۰/۷۵۰     | -۷۲/۹۴۱        |
| ۴                 | ۶/۱۸۳     | -۱۸/۶۰۱        |
| ۵                 | ۰/۱۵۰     | -۱۳۷/۵۰۵       |
| ۶                 | ۱/۴۴۹     | -۱۶۴/۴۰۴       |
| ۷                 | ۰/۰۷۰     | ۱۱۶/۳۲۰        |
| ۸                 | ۰/۴۳۶     | -۱۲۸/۳۰۶       |
| ۹                 | ۰/۰۴۵     | ۶۱/۱۸۵         |
| ۱۰                | ۰/۰۶۳     | ۱۲/۳۱۱         |
| ۱۱                | ۰/۰۱۵     | -۷۸/۹۶۶        |
| ۱۲                | ۰/۰۹۷     | -۵۵/۲۲۶        |
| ۱۳                | ۰/۰۱۱     | -۸۱/۳۲۹        |
| ۱۴                | ۰/۰۹۱     | -۲۴/۶۷۴        |
| ۱۵                | ۰/۰۱۶     | -۱۹/۷۹۰        |
| ۱۶                | ۰/۰۵۸     | -۴۹/۶۰۹        |
| ۱۷                | ۰/۰۳۲     | -۴۱/۶۴۴        |
| ۱۸                | ۰/۰۷۰     | -۲۳/۹۰۹        |
| ۱۹                | ۰/۰۲۷     | -۷۱/۲۵۵        |
| ۲۰                | ۰/۰۱۵     | ۰/۳۸۲          |
| ۲۱                | ۰/۰۰۵     | -۷۲/۹۰۷        |



چنانچه مشاهده می‌شود دامنه اکثر هارمونیک‌های نیروهای شعاعی در حالتی که ماشین تحت شرایط نامی با منبع سینوسی تغذیه شده است نسبت به حالت بی‌باری بیشتر شده است. این امر سبب می‌شود که نویز ماشین در این هارمونیک‌ها، نسبت به حالت بی‌باری افزایش یابد.

### ۵-۲-۲-۲- راه اندازی موتور توسط درایو

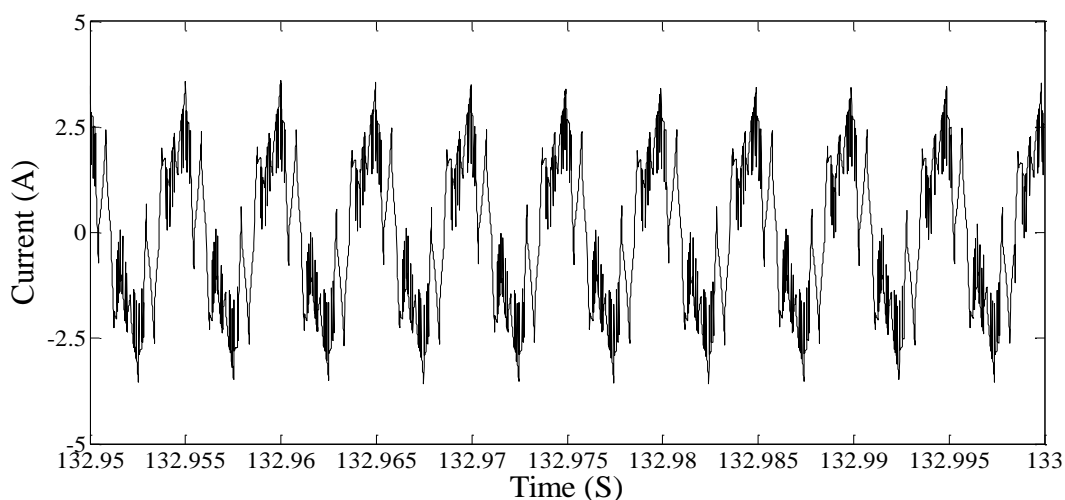
مشابه بخش قبل مدار معادل موتور در محیط متلب شبیه سازی می‌گردد با این تفاوت که در این حالت جهت راه اندازی موتور به جای استفاده از منبع تغذیه سینوسی از مدار درایو به روش کنترل مستقیم گشتاور<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. شکل (۵-۲۰) شماتیک شبیه‌سازی موتور طراحی شده به همراه مدار درایو را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۰): شماتیک شبیه‌سازی موتور طراحی شده به همراه درایو در محیط سیمولینک

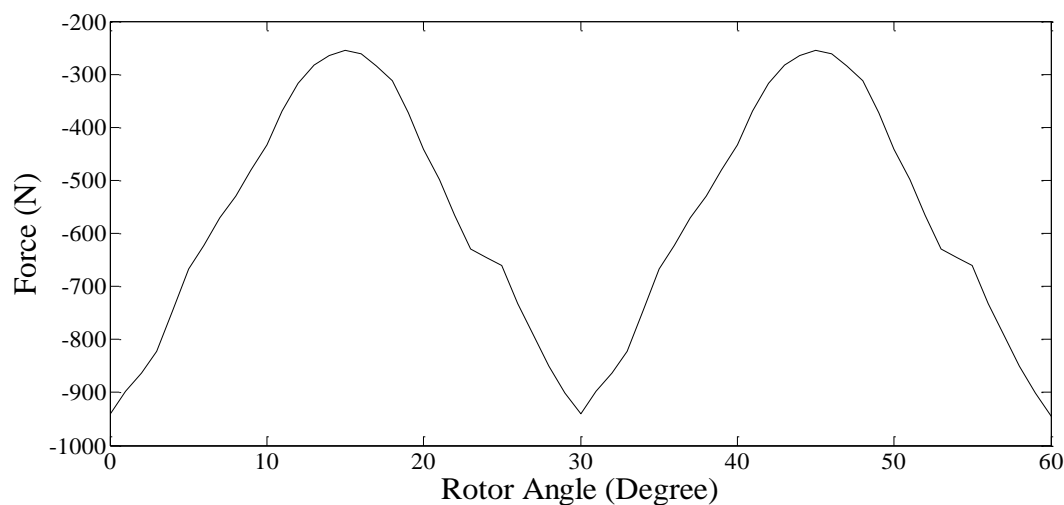
با ایجاد شرایط نامی توسط مدار درایو، جریان کشیده شده توسط موتور اندازه‌گیری می‌گردد. شکل (۵-۲۱) جریان یک فاز جهت اعمال به موتور در محیط اجزاء محدود را نشان می‌دهد.

1- Direct Torque Control (DTC)



شکل (۲۱-۵): جریان جاری شده در فاز a استاتور

همانطور که مشاهده می‌شود جریان موتور دارای هارمونیک‌های زیادی است که این امر سبب افزایش ریپل گشتاور موتور و نویز تولیدی آن خواهد شد. با اعمال این جریان به نرم‌افزار اجزاء محدود، نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور بدست می‌آید. شکل (۲۲-۵) این نیروها را نشان می‌دهد.



شکل (۲۲-۵): نیروی شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور در حالت تغذیه با درایو

با توجه به مرجع [۱] چنانچه موتور توسط درایو DTC راه اندازی شود هارمونیک‌هایی در ولتاژ تغذیه آن ظاهر خواهد شد. وجود این هارمونیک‌ها باعث افزایش هارمونیک‌های نیروهای شعاعی وارد بر دندانه‌های استاتور می‌گردد. برای بررسی این مطلب جدول (۴-۵) نتایج آنالیز هارمونیک‌های نیروهای شعاعی وارد بر دندانه استاتور را در حالتی که موتور توسط درایو DTC راه اندازی شود نشان می‌دهد.

جدول (۴-۵): نتایج آنالیز هارمونیک نیروهای شعاعی وارد بر دندان استاتور در حالت تغذیه با درایو

| شماره هارمونیک‌ها | دامنه (N) | زاویه (Degree) |
|-------------------|-----------|----------------|
| ۰                 | ۵۶۸/۷۶۴   | ۱۸۰            |
| ۱                 | ۶/۷۷۵     | ۱۷۳/۷۸۹        |
| ۲                 | ۳۰۸/۶۲۸   | -۱۶۷/۸۱۱       |
| ۳                 | ۲/۶۱۲     | ۱۰۸/۸۰۹        |
| ۴                 | ۱۱/۸۶۵    | ۱۶۸/۳۹۱        |
| ۵                 | ۲/۸۰۶     | ۷۱/۸۶۱         |
| ۶                 | ۳۰/۸۵۶    | -۱۶۴/۴۱۸       |
| ۷                 | ۱/۱۵۱     | -۱۵۰/۲۰۸       |
| ۸                 | ۱۴/۶۲۴    | -۱۴۵/۶۷۲       |
| ۹                 | ۰/۳۸۹     | ۸۶/۹۹۶         |
| ۱۰                | ۴/۱۲۶     | -۳/۰۱۹         |
| ۱۱                | ۲/۳۰۱     | ۱۰۲/۸۳۶        |
| ۱۲                | ۵/۰۹۰     | ۱۶/۱۷۴         |
| ۱۳                | ۱/۲۶۶     | -۵۷/۴۴۶        |
| ۱۴                | ۱/۳۳۰     | ۱۴۰/۷۰۹        |
| ۱۵                | ۰/۸۳۴     | -۵۶/۵۷۸        |
| ۱۶                | ۵/۷۶۴     | -۱۰۳/۰۱۴       |
| ۱۷                | ۲/۳۱۰     | ۱۶۸/۵۴۳        |
| ۱۸                | ۵/۹۱۱     | -۵۵/۰۱۴        |
| ۱۹                | ۱/۱۳۱     | ۱۲۵/۶۵۷        |
| ۲۰                | ۳/۰۶۱     | ۱۶/۲۸۵         |
| ۲۱                | ۱/۱۵۰     | ۳۰/۰۴۳         |

با مقایسه نتایج این جدول با جدول (۳-۵) می‌توان دریافت که چنانچه موتور توسط درایو راه اندازی شود، دامنه هارمونیک‌های نیروی شعاعی در مقایسه با حالتی که موتور توسط منبع سینوسی تغذیه شود، می‌تواند افزایش یابد که این امر سبب افزایش نویز تولیدی موتور توسط این هارمونیک‌ها خواهد شد.

## ۳-۵- تحلیل ساختاری

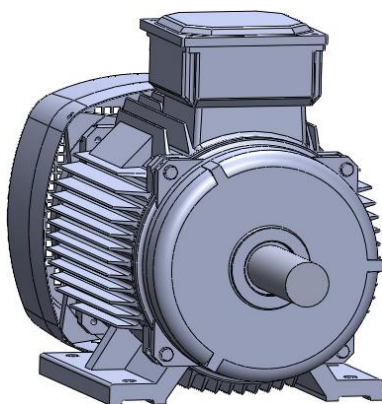
در بخش قبل با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی دینامیکی نیروهای شعاعی و ریپل گشتاور موتور طراحی شده تحت شرایط مختلف کاری بررسی شد. همچنین روش‌هایی برای کاهش این دو پارامتر ارائه گردید. در این بخش به تحلیل ساختاری موتور پرداخته می‌شود و فرکانس‌های طبیعی و ارتعاش آن محاسبه می‌گردد.

### ۳-۵-۱- بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی موتور

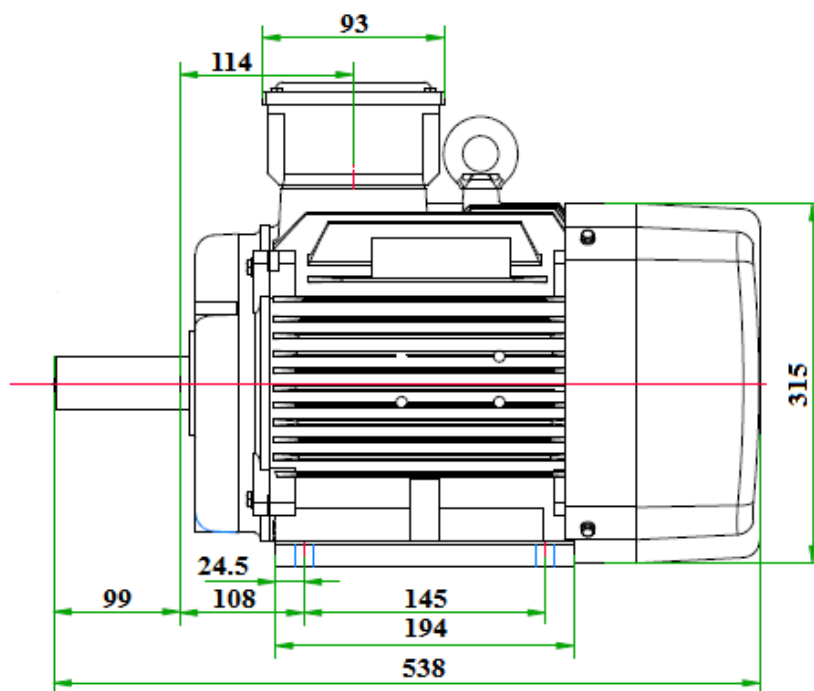
برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی ماشین به روش اجزاء محدود، جسم مورد مطالعه به صورت مجموعه‌ای از عناصر کوچک مدل گردیده که هر عنصر در حکم یک سیستم جرم-فنر-دمپر می‌باشد و با مطالعه نحوه نوسان این مجموعه از عناصر، رفتار ارتعاشی جسم و در نتیجه فرکانس‌های طبیعی آن بدست می‌آید. در این روش هر عنصر از یک جرم نقطه‌ای کوچک تشکیل گردیده که به صورت یک گره در نظر گرفته می‌شود. گره‌ها آنقدر کوچکند که خود فاقد رفتار ارتعاشی و کشسانی بوده و تنها رفتار نوسانی خواهند داشت. هر دو گره مجاور از طریق یک فنر کوچک به یکدیگر متصلند و با حل معادله نوسان برای مجموعه این گره‌ها و فنرها، فرکانس‌های طبیعی ماشین بدست می‌آید.

برای بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی موتور طراحی شده در محیط اجزاء محدود نیاز است تا اطلاعاتی از برخی اجزاء موتور از قبیل پوسته، یاتاقان‌ها، شفت و... در دسترس باشد. اما از آنجائی که این نوع موتور هنوز به تولید انبوه نرسیده و نمونه‌های ساخته شده از آن هم به صورت آزمایشگاهی

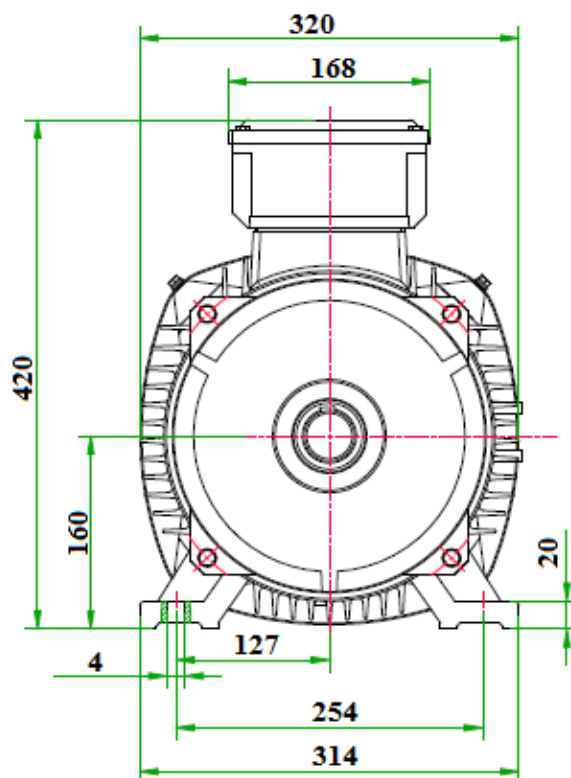
بوده لذا اطلاعات دقیقی از نوع پوسته آن در دسترس نمی‌باشد. بنابراین برای انتخاب پوسته، می‌توان از پوسته‌هایی که توسط کمپانی‌های بزرگ موتورسازی طراحی می‌شود استفاده کرد. یک نمونه از پوسته‌هایی که از نظر اندازه برای موتور طراحی شده مناسب است در شکل (۵-۲۳) نشان داده شده است. ابعاد این نوع پوسته در شکل (۵-۲۴) نشان داده شده است. در روش‌های تحلیلی اولیه که هنوز هم گاهی اوقات برای تجزیه و تحلیل ارتعاشات ماشین‌های الکتریکی به کار می‌رود، استاتور و قاب آنرا به عنوان یک استوانه سه بعدی در نظر می‌گیرند و برای آن فرکانس‌های طبیعی را محاسبه می‌کنند [۱]. همچنین با توجه به مرجع [۳] در بررسی نویز تولیدی ماشین‌های الکتریکی اغلب فقط ارتعاشات استاتور در نظر گرفته می‌شود اگرچه نویز منتهی به نتیجه ارتعاش استاتور و پوسته است و از سطح پوسته منتشر می‌شود. اگرچه پاسخ ارتعاش ماشین با در نظر گرفتن پوسته با ارتعاش استاتور تنها تفاوت دارد اما در نظر گرفتن پوسته در واقع سبب پیچیدگی محاسبات می‌شود. چنانچه از پوسته چشم‌پوشی شود محاسبه سطح ارتعاش استاتور پاسخ قابل قبولی نسبت به سطح ارتعاش کل ماشین می‌دهد. در واقع با صرف‌نظر از پوسته سطح ارتعاش بدست آمده اندکی نسبت به حالتی که پوسته در محاسبات لحاظ شود بیشتر است اما دامنه تغییرات قابل قبول می‌باشد [۳]. با توجه به توضیحات داده شده می‌توان نتیجه گرفت که چنانچه پوسته بسیار دقیقی هم برای ماشین طراحی نشود پاسخ بدست آمده از دقت خوبی برخوردار خواهد بود.



شکل (۵-۲۳): پوسته انتخاب شده برای موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده



نمای جانبی



نمای روبرو

شکل (۵-۲۴): ابعاد فریم انتخاب شده برای موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده

برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی موتور طراحی شده نیاز است تا مدلی ۳ بعدی از ۶ فاز ماشین به همراه پوسته انتخاب شده رسم شود و به روش اجزاء محدود رفتار ماشین را تجزیه و تحلیل کرد. برای این کار نیز از نرم‌افزار تخصصی ترسیم یعنی Solidworks، استفاده شده است سپس با وارد کردن هندسه ترسیم شده در محیط نرم افزار JMAG Designer، فرکانس‌های طبیعی موتور تعیین می‌شود. پس از وارد کردن هندسه ترسیم شده در محیط اجزاء محدود ابتدا نیاز است تا جنس مواد، محدودیت‌ها و مش‌بندی اعمال شوند.

### ۵-۳-۱-۱- انتخاب مواد سازنده

اولین گام برای بررسی ارتعاشات موتور و تعیین فرکانس‌های طبیعی در محیط اجزاء محدود تعیین جنس و مشخصات مکانیکی مواد سازنده قسمت‌های موتور که در تحلیل ساختاری مورد بررسی قرار می‌گیرند، می‌باشد. در جدول (۵-۵) مشخصات مواد بکار رفته و پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل ارتعاشات موتور داده شده است.

جدول (۵-۵): مشخصات مواد بکار رفته در ساختار موتور طراحی شده

| ضریب پواسون | مدول یانگ<br>(MPa) | چگالی<br>$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ | نوع ماده        | قطعه                                    |
|-------------|--------------------|----------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|
| ۰/۱۸        | ۱۱۷۰۰۰             | ۷۳۵۰                                   | SMC 500         | هسته استاتور،<br>متمرکزکننده‌های<br>شار |
| ۰/۳۴۳       | ۱۳۰۰۰۰             | ۸۹۶۰                                   | مس              | سیم‌پیچی                                |
| ۰/۳۳        | ۷۵۰۰۰              | ۲۷۰۰                                   | آلیاژ آلومینیوم | عایق مغناطیسی و<br>فضای داخلی روتور     |
| ۰/۳         | ۱۰۰۰۰۰             | ۷۴۰۰                                   | چدن             | پوسته                                   |
| ۰/۲۸        | ۲۰۰۰۰۰             | ۷۸۵۰                                   | فولاد           | پیچ‌ها، واشرها،<br>روکش فن، شفت         |

پس از مشخص کردن مواد سازنده نیاز است تا محدودیت‌های شبیه‌سازی اعمال گردد. این محدودیت‌ها شامل اعمال جرم روتور و محدود سازهای حرکتی می‌باشند که در بخش‌های بعدی به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۵-۳-۱-۲- محاسبه جرم روتور

در بررسی ارتعاشات و نویز موتور، فقط ارتعاشات استاتور را در نظر گرفته و از ارتعاشات روتور صرف‌نظر می‌شود زیرا صوت منتشر شده ناشی از ارتعاشات روتور بسیار کمتر از صوت منتشر شده ناشی از ارتعاشات استاتور است. البته این موضوع در مورد موتورهای با روتور بیرونی صادق نیست. اما برای بررسی دقیق‌تر ارتعاشات موتور، می‌توان مجموعه روتور را به صورت یک جرم در نظر گرفته و بر روی شفت اعمال کرد. برای این منظور باید جرم آهنرباهای دائم، متمرکزکننده‌های شار، فضای داخل روتور و پروانه‌ها را در نظر گرفت اما از آنجایی که اطلاعات کافی از ابعاد پروانه‌ها در اختیار نیست، از جرم پروانه‌ها صرف‌نظر می‌شود و توسط روابط زیر جرم روتور محاسبه می‌گردد:

$$m_1 = \rho_1 V_1 = \rho_1 \int_0^L \int_0^{\theta_{PM}} \int_{D_r/2}^{(D_g/2)-g} r dr d\phi dz \quad (5-5)$$

$$m_2 = \rho_2 V_2 = \rho_2 \int_0^L \int_0^{\theta_{Flux}} \int_{D_r/2}^{(D_g/2)-g} r dr d\phi dz \quad (6-5)$$

$$m_3 = \rho_3 V_3 = \rho_3 \int_0^L \int_0^{\pi} \int_{r_1}^{(D_r/2)} r dr d\phi dz \quad (7-5)$$

$$m_4 = \rho_4 V_4 = \rho_4 \int_0^L \int_0^{\pi} \int_{r_1}^{(D_g/2)-g} r dr d\phi dz \quad (8-5)$$

$$m = 72 \times (m_1 + m_2) + 6m_3 + 5m_4 \quad (9-5)$$

که در این روابط  $L_n$  طول محوری ماده ضد مغناطیسی برای جلوگیری از نشت شار بین فازها



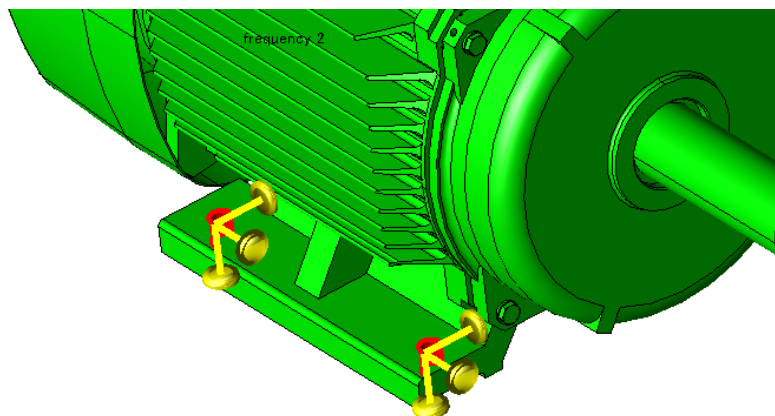
می‌باشد. در موتور طراحی شده این طول 3 mm در نظر گرفته شده است. همچنین  $r_1$ ،  $\theta_{PM}$ ،  $\theta_{Flux}$ ،  $\rho_1$ ،  $\rho_2$ ،  $\rho_3$  و  $\rho_4$  به ترتیب شعاع شفت، زاویه کمان آهنرباهای دائم بر حسب رادیان، زاویه کمان متمرکزکننده‌های شار بر حسب رادیان، چگالی حجمی آهنرباهای دائم، چگالی حجمی متمرکزکننده‌های شار، چگالی حجمی ماده مربوط به فضای داخلی روتور و ماده ضد مغناطیسی برای جلوگیری از نشت شار می‌باشند.  $m_1$  جرم آهنربای دائم،  $m_2$  جرم متمرکزکننده شار،  $m_3$  جرم فضای داخلی روتور و  $m_4$  جرم ماده ضد مغناطیسی می‌باشد. این روابط برای حالتی است که سطح بالائی و پایینی متمرکزکننده شار اصلاح نشده باشد. برای محاسبه جرم کل هنگامی که از متمرکزکننده اصلاح شده استفاده شود می‌توان از نرم‌افزار Solidworks استفاده کرد. از قابلیت‌های این نرم‌افزار محاسبه جرم و حجم اشکال هندسی سه بعدی می‌باشد. با استفاده از روابط داده شده و به کمک این نرم‌افزار جرم کل برابر است با:

$$m = 15.22 \text{ Kg}$$

به جای شبیه‌سازی روتور، این جرم بر روی شفت اعمال می‌شود.

### ۵-۳-۱-۳- اعمال محدود سازهای حرکتی

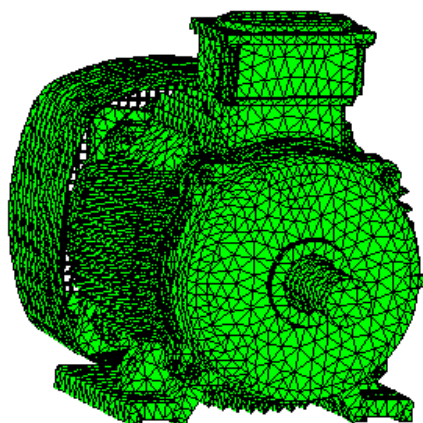
با اعمال نیرو به ساختار ماشین، پاسخ ارتعاشی سیستم به صورت حرکت آزاد خواهد بود نه لرزش جابجایی. بنابراین نیاز است محدودیت‌های حرکتی در برخی از نقاط موتور بخصوص نقاط اتصالات اعمال شود. این محدودیت‌ها باید به گونه‌ای اعمال شود که در این نقاط موتور، هیچگونه حرکتی و در هیچ جهتی وجود نداشته باشد به عبارت دیگر این نقاط باید ثابت شوند. یک نمونه از اعمال محدودیت حرکتی در شکل (۵-۲۵) نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۵): اعمال محدود ساز حرکتی

### ۵-۳-۱-۴- مش بندی

در این حالت نیز مش بندی تاثیر زیادی بر دقت جواب های بدست آمده می گذارد. چنانچه مش بندی بیش از اندازه بزرگ باشد دقت جواب های حاصله پایین آمده و حتی ممکن است فرکانس های طبیعی و پاسخ ارتعاشی حاصل کاملا اشتباه باشد. از آنجائی که در تحلیل ارتعاشات نیاز است تا کل ماشین مدل شود ایجاد مش بندی بیش از اندازه کوچک سبب می شود که حجم محاسبات افزایش پیدا کرده و حتی حافظه کامپیوترهای موجود قادر به حل مسئله نباشد. بنابراین با ایجاد مش بندی مناسب که توسط تجربه حاصل می شود می توان ساختار موتور را مش زد. در شکل (۵-۲۶) یک مش بندی مناسب بر روی موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۶): مش بندی انجام شده روی موتور TFPM مورد بررسی برای انجام تحلیل ساختاری

### ۵-۳-۱-۵- نتایج حاصل از انجام تحلیل ساختاری

با انجام مش‌بندی و تعیین قیود موتور طراحی شده مدل حاصل جهت انجام تحلیل ساختاری آماده می‌شود. با اجرای شبیه‌سازی، می‌توان فرکانس‌های طبیعی موتور طرح نهایی را تعیین کرد. اما پیش از تعیین فرکانس‌های طبیعی موتور طرح نهایی نیاز است به بررسی تاثیر روتور بر روی فرکانس‌های طبیعی پرداخت. در فصل قبل روشی برای جلوگیری از به اشباع رفتن متمرکزکننده‌های شار ارائه شد. نشان داده شد که با گسترش سطح زیرین متمرکزکننده‌های شار به سمت داخل، نیروهای شعاعی کاهش پیدا می‌کنند. اما از آنجائی که در این پژوهش روتور هم در تحلیل ساختاری در نظر گرفته شده است و به صورت جرمی بر روی شفت قرار داده می‌شود این تغییر ابعاد متمرکزکننده شار می‌تواند سبب تغییر فرکانس‌های طبیعی موتور شود. برای بررسی دقیق‌تر، فرکانس‌های طبیعی موتور در حالتی که از ساختار متمرکزکننده شار متداول استفاده شده و در حالتی که از ساختار اصلاح شده متمرکزکننده شار استفاده شود در جدول (۵-۶) داده شده است. در این مطالعه، استخراج تعداد ۲۰ فرکانس طبیعی در نظر گرفته شده است. چنانچه مشاهده می‌شود بسیاری از فرکانس‌های طبیعی موتور با ایجاد تغییر در متمرکزکننده شار تغییر کرده است.

جدول (۵-۶): فرکانس‌های طبیعی موتور در دو حالت به اشباع رفتن متمرکزکننده شار و استفاده از متمرکزکننده شار اصلاح شده

| فرکانس‌های طبیعی ماشین با متمرکزکننده اصلاح شده (Hz) | فرکانس‌های طبیعی در حالت اشباع (Hz) | شماره مد |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| ۵۷۸                                                  | ۵۷۸                                 | ۱        |
| ۶۶۷                                                  | ۶۷۵                                 | ۲        |
| ۷۵۷                                                  | ۷۵۷                                 | ۳        |
| ۸۵۵                                                  | ۸۵۹                                 | ۴        |
| ۸۶۱                                                  | ۸۶۳                                 | ۵        |
| ۹۲۶                                                  | ۹۲۶                                 | ۶        |
| ۱۱۲۶                                                 | ۱۱۲۷                                | ۷        |
| ۱۲۱۹                                                 | ۱۲۳۰                                | ۸        |
| ۱۲۳۶                                                 | ۱۲۵۶                                | ۹        |
| ۱۲۹۵                                                 | ۱۲۹۵                                | ۱۰       |
| ۱۳۷۱                                                 | ۱۳۷۵                                | ۱۱       |
| ۱۴۴۴                                                 | ۱۴۴۴                                | ۱۲       |
| ۱۵۱۸                                                 | ۱۵۳۶                                | ۱۳       |
| ۱۵۳۶                                                 | ۱۵۵۷                                | ۱۴       |
| ۱۵۵۵                                                 | ۱۵۶۰                                | ۱۵       |
| ۱۵۶۰                                                 | ۱۵۶۵                                | ۱۶       |
| ۱۶۲۹                                                 | ۱۶۳۷                                | ۱۷       |
| ۱۶۴۰                                                 | ۱۶۵۰                                | ۱۸       |
| ۱۷۵۱                                                 | ۱۷۹۳                                | ۱۹       |
| ۱۸۴۹                                                 | ۱۸۶۵                                | ۲۰       |

با توجه به نکته‌ای که ذکر شد می‌توان سطح زیرین متمرکزکننده‌های شار را به گونه‌ای تغییر داد که اولاً در هیچ نقطه‌ای از متمرکزکننده شار اشباع رخ ندهد ثانیاً فرکانس‌های طبیعی موتور با فرکانس نیروهای شعاعی برابر نشود و پدیده تشدید رخ ندهد. این کار با انجام شبیه‌سازی‌های بسیار در محیط اجزاء محدود عملی می‌باشد. در تحلیل الکترومغناطیسی ابعاد سطح زیرین متمرکزکننده شار با در نظر گرفتن این دو شرط تعیین شده و نیروهای شعاعی وارد بر دندان‌های استاتور بدست آمده است. جدول (۵-۷) لیستی از فرکانس‌های طبیعی موتور طرح نهایی را نشان می‌دهد. از آنجا که تعداد فرکانس‌های طبیعی یک جسم زیاد (و گاهی نامتناهی) است، در این جدول تنها ۲۰ فرکانس طبیعی آغازین نشان داده شده است. مطابق با این جدول واضح است که اولین و کوچکترین فرکانس طبیعی از عدد ۶۱۸ Hz شروع می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود هیچ کدام از ۲۰ فرکانس طبیعی بدست آمده منطبق بر فرکانس‌های نیروهای شعاعی نمی‌باشد که این امر سبب جلوگیری از وقوع تشدید می‌شود.

جدول (۷-۵): لیستی از فرکانس‌های طبیعی نخست حاصل از انجام تحلیل ساختاری

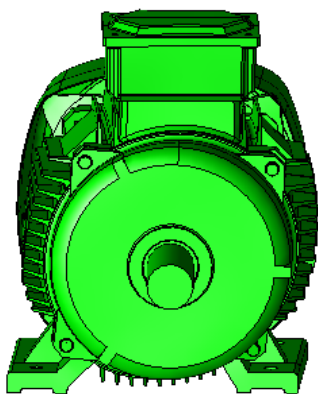
| فرکانس‌های طبیعی (Hz) | شماره مد |
|-----------------------|----------|
| ۶۱۸                   | ۱        |
| ۶۶۶                   | ۲        |
| ۷۸۳                   | ۳        |
| ۸۵۵                   | ۴        |
| ۸۶۱                   | ۵        |
| ۱۱۲۵                  | ۶        |
| ۱۲۱۷                  | ۷        |
| ۱۲۲۳                  | ۸        |
| ۱۲۲۴                  | ۹        |
| ۱۲۳۲                  | ۱۰       |
| ۱۳۷۳                  | ۱۱       |
| ۱۵۰۹                  | ۱۲       |
| ۱۵۴۴                  | ۱۳       |
| ۱۵۵۵                  | ۱۴       |
| ۱۵۷۳                  | ۱۵       |
| ۱۶۳۱                  | ۱۶       |
| ۱۶۳۷                  | ۱۷       |
| ۱۷۴۶                  | ۱۸       |
| ۱۸۰۶                  | ۱۹       |
| ۱۸۴۶                  | ۲۰       |

## ۵-۳-۲- بررسی ارتعاشات موتور TFPM قطب چنگالی طراحی شده

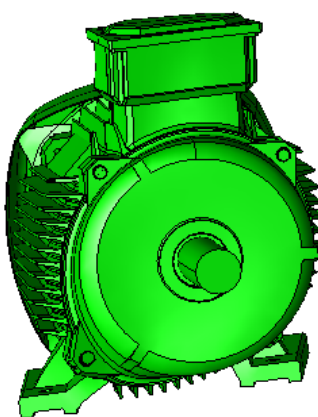
هنگامی که نیروهای شعاعی به دندانه‌های استاتور وارد می‌شود استاتور شروع به لرزیدن می‌کند. دامنه نیروهای شعاعی و همچنین فرکانس آن‌ها تاثیر زیادی بر دامنه ارتعاش ذرات تشکیل دهنده ساختار موتور دارد. اگر فرکانس نیروهای وارده به دندانه استاتور با یکی از فرکانس‌های طبیعی موتور برابر باشد پدیده تشدید رخ می‌دهد که باعث ایجاد ارتعاش ذرات تشکیل دهنده موتور با دامنه چشمگیری می‌شود. البته دامنه این ارتعاش به خاصیت میراکنندگی ساختار موتور هم بستگی دارد. شکل‌های مختلف ارتعاش استاتور سبب ایجاد نویز با دامنه‌های متفاوتی می‌شود. ارتعاش شعاعی یوغ استاتور منبع غالب در ایجاد نویز صوتی می‌باشد. بدین منظور در این بخش تاثیر نیروهای شعاعی محاسبه شده در بخش‌های قبل بر روی ارتعاش یوغ استاتور بررسی می‌شود. البته در این فرآیند کل موتور در محیط اجزاء محدود مدل شده و کلیه مراحل شبیه‌سازی دقیقاً مانند بخش محاسبه فرکانس‌های طبیعی موتور است و لذا از تکرار آن خودداری می‌شود. تنها تفاوت مراحل شبیه‌سازی این بخش با بخش قبل این است که در این بخش برای بررسی رفتار ارتعاشی ساختار موتور باید نیروهای شعاعی محاسبه شده به عنوان عامل تحریک به دندانه‌های استاتور وارد شوند. بر طبق استاندارد IEC 60034-9, 2003 این نیروها تحت شرایط زیر محاسبه و به موتور اعمال می‌شود [۲۶]:

- موتور باید به ولتاژ نامی خود متصل شود.
- موتور باید در فرکانس نامی خود کار کند.
- موتور باید در سرعت نامی خود بچرخد.
- موتور باید در حالت بی‌باری راه‌اندازی شود. در صورت نیاز می‌توان موتور را در حالت بارداری بررسی کرد اما محدودیت‌ها در این حالت با حالت بی‌باری متفاوت است.
- پایه‌های موتور می‌تواند غیر ثابت و یا ثابت (متصل به زمین) باشد. چنانچه پایه‌های موتور غیر ثابت

باشند جرم پایه‌ها نباید از  $\frac{1}{10}$  جرم موتور تحت آزمایش بزرگتر باشد و چنانچه پایه‌ها ثابت باشند موتور باید بر روی سطحی ثابت شده باشد که از نظر ابعاد متناسب با موتور باشد. همچنین سطحی که موتور بر روی آن ثابت شده است نباید دارای لقی باشد. با در نظر گرفتن این شرایط پاسخ ارتعاشی سیستم بدست می‌آید. در شکل‌های (۲۷-۵)، (۲۸-۵) و (۲۹-۵) نحوه پاسخ قسمت‌های مختلف موتور به نیروهای اعمالی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقیاس این شکل‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و هدف فقط نشان دادن نحوه جابجائی قسمت‌های مختلف موتور در فرکانس‌های مختلف می‌باشد.

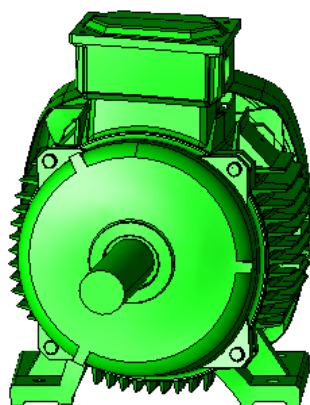


شکل (۲۷-۵): نمای ارتعاش مدل مورد بررسی در فرکانس ۶۰۰ Hz



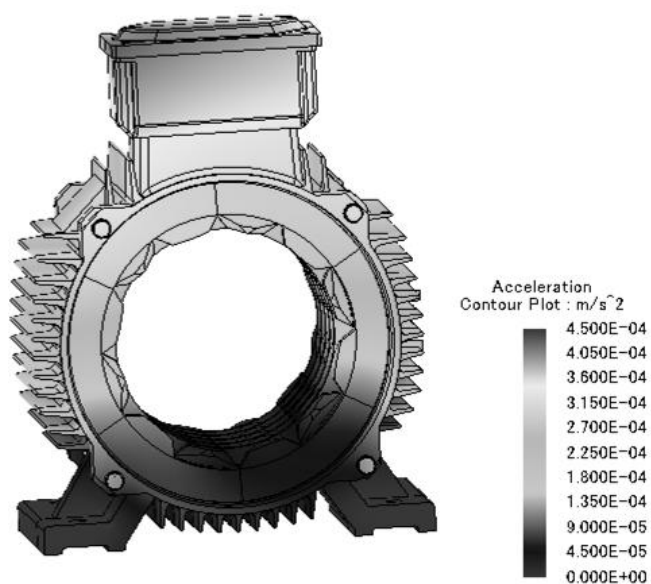
شکل (۲۸-۵): نمای ارتعاش مدل مورد بررسی در فرکانس ۸۰۰ Hz



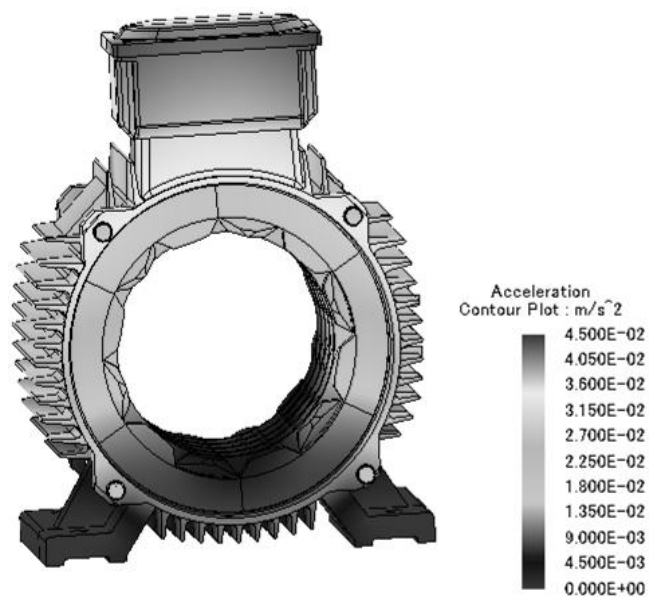


شکل (۵-۲۹): نمای ارتعاش مدل مورد بررسی در فرکانس ۱۲۰۰ Hz

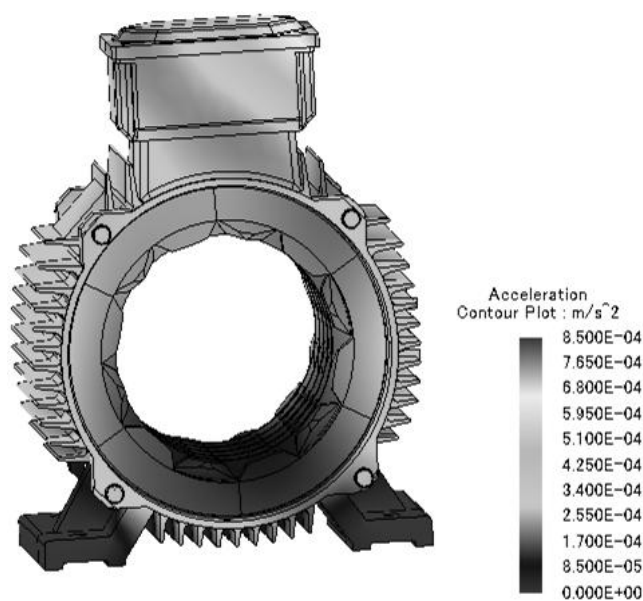
از جمله موارد دیگری که معمولاً در بررسی ارتعاشات موتورها محاسبه می‌شود شتاب ذرات موتور در پاسخ به نیروهای اعمالی است. در شکل‌های (۵-۳۰)، (۵-۳۱) و (۵-۳۲) شتاب بخش‌های مختلف موتور به ازای اعمال نیرو به دندانه‌های استاتور نشان داده شده است.



شکل (۵-۳۰): شتاب ذرات تشکیل دهنده موتور در فرکانس ۶۰۰ Hz



شکل (۵-۳۱): شتاب ذرات تشکیل دهنده موتور در فرکانس ۸۰۰ Hz



شکل (۵-۳۲): شتاب ذرات تشکیل دهنده موتور در فرکانس ۱۲۰۰ Hz

علت تغییر رنگ قسمت‌های مختلف موتور که در واقع بیان کننده تفاوت شتاب ذرات در این نقاط می‌باشد وجود محدود سازهای حرکتی، تفاوت در جنس قسمت‌های مختلف و تفاوت در نیروهای وارد شده به بخش‌های مختلف موتور می‌باشد.

## ۵-۴- تحلیل فرکانسی

در بخش قبل ارتعاشات موتور طراحی شده به روش اجزاء محدود بررسی شد. در این بخش با انجام تحلیل فرکانسی صوت تولیدی موتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور مشابه با تحلیل ارتعاشات از نرم افزار اجزاء محدود استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که برای بررسی نویز ماشین-های الکتریکی استانداردهای مختلفی وجود دارد بطوریکه برخی از آنها برای گستره وسیعی از تغییرات به کار می‌روند اما برخی دیگر فقط در شرایط خاصی کاربرد دارند. همچنین هر یک از استانداردها از روش‌های خاصی جهت اندازه‌گیری صوت ماشین‌ها استفاده می‌کنند. از آنجایی که شرایط اندازه‌گیری صوت با توجه به نوع موتور، سرعت آن، اتاقی که موتور در داخل آن مورد آزمایش قرار می‌گیرد و ... تغییر می‌کند لذا برای محاسبه نویز صوتی موتور طراحی شده باید از یکی از این استانداردها استفاده کرد. در این پایان‌نامه از استاندارد IEC 60034-9, 2003 که روش اندازه‌گیری آن بر مبنای استاندارد ISO 3745, 2003 استفاده شده است. در اینجا نیز مانند تحلیل ساختاری نیاز است تا مدلی ۳ بعدی از کل موتور در محیط اجزاء محدود شبیه‌سازی شود. سپس محدودیت‌های حرکتی، سطح اندازه‌گیری صوت و محل قرارگیری میکروفون‌ها مشخص شوند و در نهایت با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به عنوان عامل تحریک و با مش‌بندی مناسب، نویز موتور بر طبق روش این استاندارد اندازه‌گیری شود. بسیاری از این مراحل شبیه‌سازی مشابه تحلیل ارتعاشات می‌باشد بنابراین از تکرار مکررات خودداری می‌گردد و در ادامه برخی از این مراحل شبیه‌سازی که در بخش‌های قبل ذکر نشده است توضیح داده می‌شود.

## ۵-۴-۱- تعیین سطح اندازه‌گیری صوت

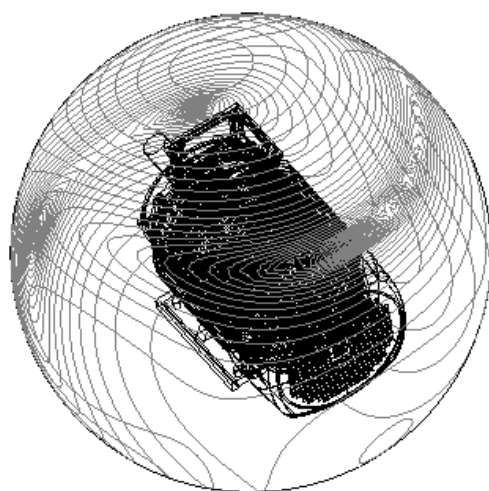
اندازه‌گیری سطح فشار صوت معمولاً در فاصله مشخصی از موتور و بر روی سطحی که موتور را احاطه کرده است انجام می‌شود. این سطح می‌تواند سطح یک کره و یا نیم‌کره باشد. معمولاً از سطح کره برای اندازه‌گیری صوت در محیط فاقد انعکاس صوت و از سطح نیم‌کره برای اندازه‌گیری صوت

در محیطی با خاصیت نیمه انعکاسی استفاده می‌شود. در این پایان نامه از سطح کروی برای اندازه-گیری صوت موتور استفاده می‌شود. مطابق شکل (۵-۳۳) این سطح کروی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مرکز آن ترجیحاً منطبق بر مرکز منبع صوتی باشد. از آنجایی که اغلب مرکز منبع صوتی نامشخص است باید یک مرکز فرضی (برای مثال مرکز هندسی) برای منبع صوتی در نظر گرفت و این مورد را به وضوح در گزارشات اندازه‌گیری صوت بیان کرد. شعاع سطح کره‌ای که اندازه‌گیری بر روی آن انجام می‌شود باید برابر یا بزرگتر از موارد زیر باشد [۲۷]:

۱- برابر بزرگترین بعد (طول، عرض و یا ارتفاع) ماشین

۲- 1 m

در این پایان‌نامه شعاع این سطح کروی 1 m در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۵-۳۳): سطح کروی برای اندازه‌گیری نویز موتور طراحی شده در محیط اجزاء محدود

## ۵-۴-۲- تعیین موقعیت میکروفون‌ها

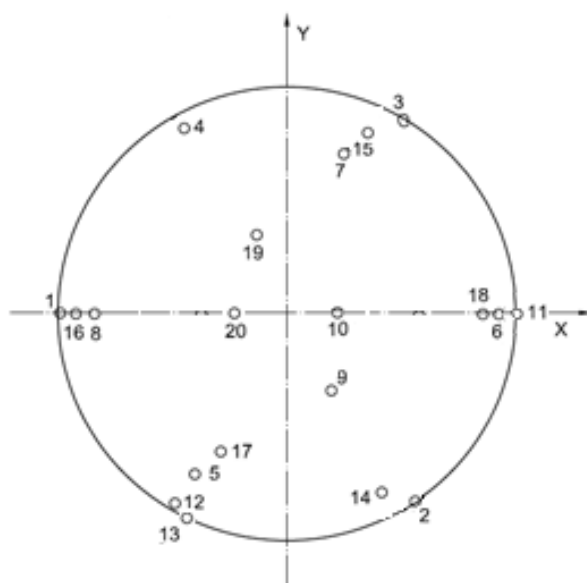
در استانداردها آرایش‌های مختلفی برای تعیین موقعیت میکروفون‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری صوت پیشنهاد شده است. در این پایان‌نامه از آرایش میکروفون‌های ثابت ارائه شده در

استاندارد ISO 3745,2003 استفاده شده است. محل قرارگیری میکروفون‌ها در این آرایش در جدول (۸-۵) داده شده است. این نوع آرایش برای اندازه‌گیری در اتاق بدون انعکاس به کار می‌رود.

جدول (۸-۵): موقعیت میکروفون‌ها بر روی سطح کروی

| شماره نقاط | x     | y     | z     |
|------------|-------|-------|-------|
| ۱          | -۱/۰۰ | ۰     | ۰     |
| ۲          | ۰/۴۹  | -۰/۸۶ | ۰/۱۵  |
| ۳          | ۰/۴۸  | ۰/۸۴  | ۰/۲۵  |
| ۴          | -۰/۴۷ | ۰/۸۱  | ۰/۳۵  |
| ۵          | -۰/۴۵ | -۰/۷۷ | ۰/۴۵  |
| ۶          | ۰/۸۴  | ۰     | ۰/۵۵  |
| ۷          | ۰/۳۸  | ۰/۶۶  | ۰/۶۵  |
| ۸          | -۰/۶۶ | ۰     | ۰/۷۵  |
| ۹          | ۰/۲۶  | -۰/۴۶ | ۰/۸۵  |
| ۱۰         | ۰/۳۱  | ۰     | ۰/۹۵  |
| ۱۱         | ۱/۰۰  | ۰     | ۰     |
| ۱۲         | -۰/۴۹ | -۰/۸۶ | -۰/۱۵ |
| ۱۳         | -۰/۴۸ | -۰/۸۴ | -۰/۲۵ |
| ۱۴         | ۰/۴۷  | -۰/۸۱ | -۰/۳۵ |
| ۱۵         | ۰/۴۵  | ۰/۷۷  | -۰/۴۵ |
| ۱۶         | -۰/۸۴ | ۰     | -۰/۵۵ |
| ۱۷         | -۰/۳۸ | -۰/۶۶ | -۰/۶۵ |
| ۱۸         | ۰/۶۶  | ۰     | -۰/۷۵ |
| ۱۹         | -۰/۲۶ | ۰/۴۶  | -۰/۸۵ |
| ۲۰         | -۰/۳۱ | ۰     | -۰/۹۵ |

برای بررسی بهتر، محل قرارگیری میکروفون‌ها بر روی سطح کروی در شکل (۵-۳۴) نشان داده شده است. سطوح اندازه‌گیری و آرایش‌های میکروفون‌ها جهت اندازه‌گیری صوت ماشین محدود به موارد ارائه شده در این استانداردها نیست بلکه می‌توان از سطوح و آرایش‌های دیگری هم به دلخواه خود استفاده کرد. در واقع دلیل استفاده از یک آرایش جدید باید افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها باشد نه کاهش تعداد میکروفون‌ها.



شکل (۵-۳۴): محل قرارگیری میکروفون‌ها بر روی سطح کروی

اکنون با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی محاسبه شده به ساختار موتور، نویز صوتی موتور بر روی سطح کروی، بدست می‌آید. نویز اندازه‌گیری شده به ازای برخی از فرکانس‌ها در جدول (۵-۹) نشان داده شده است. با توجه به محل قرارگیری میکروفون‌ها مقادیر مختلفی برای سطح فشار صوت بدست می‌آید که به ازای هر فرکانس مقدار ماکزیمم سطح فشار صوت اندازه‌گیری شده توسط میکروفون‌ها به عنوان سطح فشار صوت در آن فرکانس در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۵-۹): سطح فشار صوت بدست آمده در فرکانس‌های مختلف

| فرکانس (Hz) | سطح فشار صوت (db) |
|-------------|-------------------|
| ۶۰۰         | ۲۹                |
| ۸۰۰         | ۴۵                |
| ۱۰۰۰        | ۲۶                |
| ۱۲۰۰        | ۳۵                |
| ۱۴۰۰        | ۲۴                |
| ۱۶۰۰        | ۳۴                |
| ۱۸۰۰        | ۲۱                |
| ۲۰۰۰        | ۳۳                |
| ۲۲۰۰        | ۲۳                |
| ۲۴۰۰        | ۳۰                |

سطح فشار صوت بدست آمده تنها نتیجه تاثیر نیروهای شعاعی بر روی موتور می‌باشد. در استانداردها محدودیت نویز کلی ماشین‌ها ارائه شده است و در رابطه با نویز الکترومغناطیسی به طور خاص محدودیتی ارائه نشده است. برای تعیین سطح فشار صوت کلی موتور باید صوت حاصل از منابع مکانیکی و آیرودینامیک را هم بدست آورد و نهایتاً از مجموع آن‌ها صوت کلی موتور را بدست آورد.

## فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات



## ۶-۱- جمع بندی و نتیجه‌گیری

ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی نوع خاصی از ماشین‌های شار متقاطع با چگالی توان و راندمان بالا می‌باشند. به دلایل مختلف صنعت محدودیت‌هایی را برای نوین ماشین‌ها تعیین کرده است که لازم است با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها ارتعاشات و در نتیجه نویز صوتی این ماشین‌ها تا حد ممکن کم باشد. در این پایان‌نامه نیروهای شعاعی الکترومغناطیسی و ریپل گشتاور به عنوان دو منبع تولید نویز در ماشین‌های الکتریکی در یک ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا الگوریتم طراحی این نوع ماشین که در مراجع معتبر ارائه شده است نقد و بررسی شد. همچنین یک نمونه از ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی مطرح شده در مقالات به روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. نشان داده شد که در بخش‌هایی از روتور و استاتور این ماشین شبیه‌سازی شده پدیده اشباع رخ می‌دهد که این پدیده یکی از عوامل افزایش نویز الکترومغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی می‌باشد. برای رفع اشکالات الگوریتم و ساختار ارائه شده در مقالات، اصلاحات و روابطی مطرح شد به گونه‌ای که این اصلاحات و روابط منجر به معرفی ماشینی قطب چنگالی با ساختار جدید گردید. با استفاده از روابط مطرح شده موتور نمونه‌ای برای دستیابی به Back-EMF سینوسی طراحی شد و صحت طراحی با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود مورد تایید قرار گرفت. سپس با انجام تحلیل الکترومغناطیسی نیروهای شعاعی و ریپل گشتاور موتور بررسی شد. نشان داده شد که با ایجاد اصلاحاتی در بخش داخلی هسته روتور می‌توان نیروهای شعاعی وارد بر دندان‌های استاتور را به طور چشمگیری کاهش داد. به منظور ارائه یک مقدار عددی با ایجاد اصلاحات در سطح داخلی هسته روتور طراحی شده، دامنه مولفه dc، هارمونیک چهارم، هارمونیک ششم و هارمونیک دهم نیروی شعاعی به ترتیب ۲۲، ۴۳، ۲۹ و ۴۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین اصلاحاتی در فاصله هوایی برای کاهش ریپل گشتاور موتور ارائه شد و با شبیه‌سازی

موتور در محیط نرم‌افزار متلب نشان داده شد که با استفاده از این اصلاحات ریپل گشتاور موتور بیش از ۲۹ درصد کاهش پیدا می‌کند.

به منظور بررسی تاثیر منبع تغذیه بر روی نیروهای شعاعی، موتور توسط منبع تغذیه سینوسی و درایو راه‌اندازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از درایو سبب افزایش نیروهای شعاعی وارد بر موتور می‌شود.

با انجام تحلیل ساختاری فرکانس‌های طبیعی موتور تعیین شد و تاثیر اصلاحات ایجاد شده در بخش داخلی روتور بر روی فرکانس‌های طبیعی موتور مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود نشان داده شد که با ایجاد این اصلاحات می‌توان از وقوع پدیده تشدید جلوگیری کرد.

بر طبق استانداردهای موجود ارتعاشات و نویز الکترومغناطیسی موتور طراحی شده به ازای فرکانس‌های مختلف بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بخش‌های مختلف موتور دارای ارتعاشات و نویز متفاوتی در نتیجه اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به ساختار آن می‌باشند.

## ۲-۶- پیشنهادات

با توجه به ساختار جدید ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی می‌توان موارد زیر را جهت پژوهش در زمینه ارتعاشات و نویز آن‌ها پیشنهاد کرد:

- ۱- بررسی مکانیکی نویز ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی
- ۲- بررسی منابع آیرودینامیک نویز ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی
- ۳- تعیین نویز ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی در محیط‌های نرم‌افزاری و آزمایشگاهی و مقایسه نتایج با یکدیگر.
- ۴- کاهش نویز ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم قطب چنگالی توسط درایو

- [1] Roivainen J., (2009), PhD. thesis, “Unit-wave response-based modeling of electromechanical noise and vibration of electrical machines”, Electrical Engineering depart. Helsinki University of Technology.
- [2] Lakshmikanth S., Natraj K. R., Rekha K. R. (2012) “Noise and vibration reduction in permanent magnet synchronous motors-a review”, **IJECE**, **2**, **3**, pp **405**.
- [3] Shahaj A. (2010), PhD. Thesis, “Mitigation of vibration in large electrical machines”, Mech. depart, University of Nottingham.
- [4] Alger P. L. and Erdelyi E. (1956) “Calculation of the magnetic noise of polyphase induction motors”, **J ACOUST SOC AM**, **28**, **6**, pp **1063-1067**.
- [5] Erdeyi E. and Horvay G. (1957) “Vibrations modes of stators of induction motors”, **ASME Trans.**, **24**, pp **39-45**.
- [6] Ellison A. and Yang S. (1971) “Natural frequencies of stators of small electric machines”, **Proc. IEE**, **118**, **1**, pp **185-190**.
- [7] Munoz D. M., (2004), PhD. thesis, “Design, modelling and control of electrical machines with applications to iron-powder machines and acoustic noise”, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University of Technology.
- [8] Chang S.C. and Yaca R. (1996) “Experimental study of the vibrational behavior of machine stators”, **IEE P-ELECT POW APPL**, **143**, **3**, pp **242-250**.
- [9] Hillhouse J. (2012) “Sound that matters”, **IEEE IND APPL MAG**, **18**, **1**, pp **38-45**.
- [10] Islam R. and Husain I. (2010) “Analytical model for predicting noise and vibration in permanent-magnet synchronous motors”, **IEEE T IND APPL**, **46**, **6**, pp **2346-2354**.
- [11] Sun T., Kim J., Lee G., Hong J. and Choi M. (2011) “Effect of pole and slot combination on noise and vibration in permanent magnet synchronous motor ”, **IEEE T MAGN**, **47**, **5**, pp **1038-1041**.

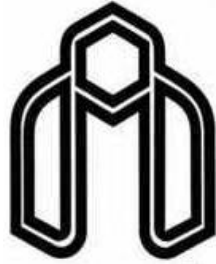
- [12] Sutthiphornsombat B., Khoobroo A., Fahimi B. (2010) “Mitigation of acoustic noise and vibration in permanent magnet synchronous machines drive using field reconstruction method”, **VPPC**, pp 1-5, Lille.
- [13] Haung S., Aydin M., and Lipo. T. A (2001) “Electromagnetic vibration and noise assessment for surface mounted pm machine”, **PES**, pp 1417-1426, Vancouver.
- [14] Bujacz S., Nieznanski J. i. (2011) “Estimation of acoustic noise of p.m. motor by multi-physical model”, **ISIE**, pp 597-600, Gdansk.
- [15] Cassoret B., Corton R., Roger D. and Brudny J. (2003) “Magnetic noise reduction of induction machines”, **IEEE T POWER ELECTR**, 18, 2, pp 570-579.
- [16] Rezig A., Mekideche M. R., Djerdir A. (2011) “ Impact of eccentricity and demagnetization faults on magnetic noise generation in brushless permanent magnet DC motors ”, **JEET**, 6, 3, pp 356-363.
- [17] Sheth N. K. and Rajagopal K. R. (2003) “Optimum pole arcs for a switched reluctance motor for higher torque with reduced ripple”, **IEEE T MAGN**, 39, 5, pp 3214-3216.
- [18] Ansys help.
- [19] Lisner R. P. and Timar P. L. (2000) “Radial force calculation and acoustic noise prediction in switched reluctance machines”, **IEEE T IND APPL**, 36, 6, pp 1589-1597.
- [20] Masmoudi A. and Elantably A. (2000) “An approach to sizing high power density TFPM intended for hybrid bus electric propulsion”, **Elect. Mach. Power Syst.**, 28, 4, pp 341–354.
- [21] Dubois M. R. J. (2004), PhD. thesis, “Optimized permanent magnet generator topologies for direct-drive wind turbines”, Electrical Engineering depart. Delft University.
- [22] Masmoudi A., Njeh A., Mansouri A., Trabelsi H. and Elantably A. (2004) “Optimizing the overlap between the stator teeth of a Claw pole transverse-flux permanent-magnet machine”, **IEEE T MAGN**, 40, 3, pp 1573-1578.

- [23] Masmoudi A., Njeh A. and Elantably A. (2005) “On the analysis and reduction of the cogging torque of a Claw pole transverse flux permanent magnet machine,” **Euro. Trans. Electr. Power**, **15**, **6**, pp 513–526.
- [24] Verma S. P. (1996) “Noise and vibrations of electrical machines and drives; their production and means of reduction,” **PEDES**, pp 1031–1037, New Delhi.
- [25] Lee J. H., Kim D. H. and Park I. H. (2003) “Minimization of higher Back-EMF harmonics in permanent magnet motor using shape design sensitivity with B-Spline parameterization,” **IEEE T MAGN**, **39**, **3**, pp 1269–1272.
- [26] International Standard IEC 60034-9, 2003.
- [27] International Standard ISO 3745, 2003.

## **Abstract**

Claw pole transverse flux permanent magnet motor (CPTFPM) presents high power density and efficiency but due to existing abnormal saliency, it may offer relatively large vibration and acoustic noises. Therefore the electromagnetic vibrations and noises of a CPTFPM are investigated in this thesis. It is shown that the main electromagnetic sources of vibrations and noises *i.e.* the saturation level, flux distribution, radial force and torque ripple of the machine are strictly related to the shapes of the teeth and pole shoes of the stator and the flux concentrators of the rotor. For the purpose to reduce the electromagnetic sources of the vibrations and noises of the machine a novel CPTFPM with particular shapes of teeth and pole shoes is introduced and the design procedure is formulated. Using presented formulas a sample motor is designed. It is shown that using some geometrical modifications in the inner part of flux concentrator and the air gap of the designed motor can reduce radial force and torque ripple significantly. The performance of the motor is investigated by carrying out electromagnetic, structural and frequency analysis using finite element method and the sound pressure level of the motor is calculated. Finite elements (FE) simulation showing excellent performance of the designed motor regarding the saturation level, flux distribution, radial force, torque ripple, vibrations and acoustic noises.

**Keywords:** Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet Motor, Radial Force, Saturation, Torque Ripple, Vibrations and Noises.



**Shahrood University of Technology**

**- Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

**Calculation of the electromagnetic noises of a permanent  
magnet motor using finite elements method**

**Reza Mirzahosseini**

**Supervisor: Dr. Ahmad Darabi**

**Date: September 2013**